Max Planck

Initiations à la physique

Traduction par
Joachim du Plessis de Grenédan

Flammarion, 1941

Printed in France

Table des matières

Initiations à la physique..1
Table des matières...3
AVANT-PROPOS..5
CHAPITRE PREMIER L'UNITÉ DE LA CONCEPTION DE L'UNIVERS EN PHYSIQUE.......................................9
CHAPITRE II VOIES D'ACCÈS NOUVELLES À LA CONNAISSANCE EN PHYSIQUE.........................53
CHAPITRE III LOIS STATISTIQUES ET LOIS DYNAMIQUES..71
CHAPITRE IV LA GENÈSE ET L'ÉVOLUTION DE LA THÉORIE DES QUANTA....................................93
CHAPITRE V LA LOI CAUSALE ET LE LIBRE ARBITRE...121
CHAPITRE VI DU RELATIF À L'ABSOLU..................177
CHAPITRE VII DE LA NATURE DES LOIS PHYSIQUES 201
CHAPITRE VIII L'UNIVERS TEL QU'IL EST AUX YEUX DE LA PHYSIQUE MODERNE................241
CHAPITRE IX LE POSITIVISME ET LA RÉALITÉ DU MONDE EXTÉRIEUR..279
CHAPITRE X LA CAUSALITÉ DANS LA NATURE...313
CHAPITRE XI ORIGINE ET ÉVOLUTION DES IDÉES SCIENTIFIQUES..351
CHAPITRE XII LA SCIENCE ET LA FOI.....................379
Retrouver un article...391

AVANT-PROPOS

Si l’on veut bien ne pas oublier que depuis ma première conférence de Leyde sur l’unité de la conception de l’univers selon la physique, vingt-cinq ans se sont écoulés, pendant lesquels cette science a subi une transformation dépassant en ampleur tout ce qu’on aurait pu prévoir d’après l’étendue de son évolution pendant les vingt-cinq années précédentes, on trouvera, certes, bien naturel qu’il se soit produit quelques modifications et même des renouvellements dans les idées d’un physicien dont la vie a été mêlée de très près au développement de sa science. Et, pourtant, je ne crois pas me tromper si j’affirme que les principes posés et défendus par moi dans toutes les grandes questions de physique et aussi tout ce que j’ai dit au sujet de la connaissance en physique, se sont trouvés confirmés par la suite. Je suis donc aujourd’hui pleinement en droit de maintenir entièrement les points de vue exposés dans mes premiers ouvrages. La pensée fondamentale qu’on trouvera partout dans ce livre, celle qui est à la base de toutes les considérations qui vont être exposées dans ces différents chapitres et qui fait d’eux, en dépit de leur diversité, un tout cohérent, est on ne peut plus simple : c’est que la physique a pour but d’explorer le monde extérieur. Le point faible de cette formule est que la réalité du monde extérieur n’est pas susceptible d’une démonstration directe, c’est pourquoi, de tout temps, elle a soulevé des objections de principe. Pour nombre de philosophes et de physiciens notables, il n’y a aucun sens à

parler d’un monde extérieur réel par opposition au monde tel que nous le donnent nos sensations immédiates.

Cette opinion, pour évidente qu’elle paraisse au premier abord et pour inattaquable qu’elle soit du point de vue logique, je la tiens pour étroite et stérile.

La recherche scientifique ne procède pas, en effet, à l’exploration de nouveaux cantons de son domaine en commençant par poser tout d’abord avec précision la question à laquelle il s’agit de répondre, pour s’attaquer seulement ensuite à la solution du problème. Tout au contraire, quiconque a travaillé à des points vraiment nouveaux de physique sait par expérience qu’il n’est pas moins difficile de poser un problème que de le résoudre et qu’il arrive souvent que l’énoncé définitif et la solution soient trouvés simultanément. Or il en est de même quand il s’agit du monde extérieur, celui-ci ne se trouve pas à l’origine, mais au terme de la recherche en physique. Ce terme, à vrai dire, on ne peut jamais complètement l’atteindre, mais on ne doit jamais le perdre de vue si l’on veut progresser. Remarquons, à ce propos, que la physique, comme toute autre science, contient un certain noyau d’irrationnalité, impossible à réduire entièrement. Et cependant considérer cet irrationnel comme se situant en dehors de la science, par définition, serait priver cette dernière de tout son dynamisme interne.

La cause de cette irrationnalité comme la physique moderne le fait ressortir de plus en plus nettement, réside dans le fait que le savant lui-même est une des parties constitutives de l’univers. Il lui est donc impossible de s’isoler complètement de ce même

univers, ce qui serait cependant nécessaire pour en avoir une connaissance pleinement objective.

D’un état de choses inévitable comme celui-là il n’y a qu’à s’accommoder tant bien que mal en se bornant à trouver sa satisfaction dans la conscience d’avoir exploré tout l’explorable, en réservant une vénération sereine à l’inexplorable. De cette satisfaction, Gœthe octogénaire disait qu’elle était la plus haute qui puisse échoir à l’homme pensant.

CHAPITRE PREMIER

L'UNITÉ DE LA CONCEPTION DE L'UNIVERS EN PHYSIQUE

I

Depuis qu'il existe une science de la nature, on lui a toujours assigné comme fin supérieure de grouper en une synthèse systématique la prodigieuse diversité des phénomènes physiques et même, si possible, de la condenser en une seule formule. Pour parvenir à ce résultat on a toujours eu recours à deux méthodes opposées. Ces deux méthodes se sont souvent trouvées en lutte, mais il est arrivé aussi qu'elles se soient corrigées mutuellement, chacune contribuant à la fécondité de l'autre, ce qui s'est produit surtout quand elles se sont trouvées réunies dans l'esprit d'un même savant qui les a successivement appliquées à un objet commun.

La première méthode, dirai-je la plus juvénile ?, consiste en une généralisation rapide de quelques données expérimentales, elle se lance hardiment dans les théories les plus générales, applicables à tout l'ensemble des phénomènes et elle met au centre de ses conceptions une notion, un postulat unique, auquel elle essaye, avec plus ou moins de succès, de soumettre la nature entière et tout ce qui s'y manifeste. Ainsi l'eau, pour

Thalès de Milet, l'énergie pour Wilhelm Ostwald sont le pivot central de leur conception de l'univers. Pour Hertz, le principe de la trajectoire la plus courte sera le lien qui unit entre eux tous les phénomènes physiques et ce qui en donne l'explication ultime.

La seconde méthode est plus circonspecte, plus modeste et plus sûre ; mais elle est loin de posséder le dynamisme de la première ; c'est pourquoi on ne l'a prise en considération que beaucoup plus tard. Elle renonce provisoirement aux résultats définitifs et se contente de tracer, de l'image du monde, les seuls traits qui lui paraissent établis avec certitude, laissant aux recherches futures le soin de compléter le tableau. Cette attitude trouve son expression la plus caractéristique dans la célèbre définition de la mécanique due à Gustave Kirchhoff : « La mécanique est la description des mouvements ayant lieu dans la nature. »

Ces deux méthodes se complètent mutuellement et jamais on ne peut se passer d'aucune d'elles dans la recherche physique. Mais ce n'est pas cette méthodologie double que je me propose d'étudier ici ; ce que je voudrais, c'est plutôt attirer l'attention sur une question d'importance plus principielle, je veux dire la question de savoir à quels résultats a conduit jusqu'à présent cette dualité de méthode et quels fruits on peut penser la voir produire dans l'avenir.

Personne ne peut contester que le développement de la physique a été dans le sens du progrès, de telle sorte que chaque décade a amélioré notre connaissance de la nature. À

défaut de toute autre preuve, un simple regard jeté sur l'importance et sur le nombre toujours croissant des inventions qui mettent la nature au service de l'homme, suffirait à nous en convaincre. Mais quelle est, dans l'ensemble, la direction qui a été suivie par le progrès ? Dans quelle mesure peut-on dire que l'on s'est vraiment rapproché du but ?

Pour celui qui se tient au courant du progrès de la science, telle est la question à laquelle il importe avant tout de répondre.

Ce premier point, une fois élucidé, nous serons par là-même en état de trancher la question, actuellement si disputée, de savoir ce que l'on veut dire au fond, quand on parle d'une représentation physique de l'univers. Est-ce que cette représentation ne serait qu'une construction de notre esprit appropriée à son but, mais somme toute, arbitraire ; ou bien au contraire devons-nous admettre que cette image du monde est la reproduction fidèle de phénomènes naturels tout à fait indépendants de nous ?

Pour déterminer la direction suivie par l'évolution de la physique, il n'y a qu'un moyen : c'est de comparer l'état où elle se trouve aujourd'hui avec ce qu'elle était autrefois. Et si l'on me demandait alors quel est le meilleur critérium externe pour apprécier à quel stade de son évolution une science est parvenue, je ne saurais en indiquer de plus général, que la manière dont cette science définit ses concepts fondamentaux et la façon dont elle comprend le partage de son domaine. Aux yeux de quiconque veut réfléchir, la précision et la propriété de ses définitions, les subdivisions parfaitement délimitées à

l'intérieur de son domaine, sont en effet, dans chaque science, ce qui renferme les résultats ultimes et les conclusions les plus mûres du travail de ses savants.

Voyons maintenant comment la physique d'autrefois s'est comportée à ce point de vue. Ce qui frappe tout d'abord, c'est que toutes les questions de physique, dans n'importe quelle branche se rattachent, soit à des besoins d'ordre immédiatement pratique, soit à des phénomènes naturels particulièrement remarquables. C'est en se plaçant à ces deux points de vue que l'on a divisé la physique en ses différentes branches. La géométrie, par exemple, tire son nom de la mesure des surfaces terrestres et de l'arpentage des champs ; la mécanique, de la construction des machines ; l'acoustique, l'optique et la théorie de la chaleur, des sensations spécifiques correspondantes ; l'électricité, des phénomènes remarquables observés quand on frotte de l'ambre ; le magnétisme, des propriétés singulières d'un minerai de fer qui s'extrayait dans le voisinage de la ville de Magnésie. D'ailleurs, conformément à l'axiome qui veut que toute notre expérience résulte des perceptions de nos sens, il est évident que la part du physiologique dans toutes les définitions de la physique est prépondérante ; en un mot, tout dans la physique, aussi bien les définitions que la structure tout entière, possède alors, en un certain sens, un caractère anthropomorphique.

Combien différent est aujourd'hui l'aspect de l'ensemble doctrinal formé par les théories de la physique ! Tout d'abord cet ensemble offre un caractère d'unité beaucoup plus

accentué. Le nombre des branches partielles dont se compose la physique est devenu moindre et cela parce que chaque canton, s’est annexé un canton voisin : l’acoustique a été englobée par la mécanique, le magnétisme et l’optique sont entrés dans le sein de l’électrodynamique. Ensuite, cette simplification a toujours été accompagnée dans toutes les définitions d’une régression correspondante de l’élément anthropomorphique, legs du passé. Y a-t-il aujourd’hui un physicien qui pense à de l’ambre frottée quand il parle d’électricité et à la mine d’Asie Mineure d’où on a extrait les premiers aimants naturels, quand il parle de magnétisme ? En acoustique, en optique, en chaleur, les sensations spécifiquement différentes qui correspondent à chacun de ces termes sont justement ce qui a été éliminé. Les définitions physiques du son, de la couleur, de la température, n’ont aujourd’hui rien à voir avec des perceptions sensibles immédiates. Le ton et la couleur sont définies aujourd’hui par un nombre de vibrations (ou une longueur d’onde). Théoriquement, la définition de la température se rattache à l’échelle des températures absolues qui est une conséquence du second principe de la thermodynamique. On pourrait dire aussi que la température est la force vive du mouvement moléculaire. En tout cas, pratiquement, c’est une grandeur qui se définit par le changement de volume d’une substance thermométrique ou par la déviation lue sur l’échelle d’un bolomètre ou d’un pyromètre thermoélectrique. De la sensation thermique, il n’est question en aucun cas.

Il en est tout à fait de même en ce qui concerne le concept de force. Indubitablement, ce mot a signifié primitivement la force humaine, en accord avec le fait, que les machines les plus anciennement connues, le levier, la poulie et la vis étaient mues par la force de l'homme ou des animaux. Le concept de force tire donc son origine du sens dynamique (ou musculaire), c'est-à-dire d'une sensation spécifique. Or, de la définition moderne de la force, cette sensation spécifique est tout aussi complètement éliminée que la sensation rétinienne l'est de la définition de la couleur.

Bien plus, cette régression de l'élément sensible spécifique dans les définitions de la physique va si loin qu'il y a des branches dont la relation à une sensation déterminée suffisait primitivement à caractériser parfaitement tout le contenu et qui ont été scindées plus tard en plusieurs tronçons entièrement distincts par suite d'un relâchement du lien qui tenait unis ces tronçons. On observe donc, à ce propos, un phénomène qui va à l'encontre de la tendance qui porte toute science vers son unification et vers son homogénéisation. Le meilleur exemple d'une évolution de ce genre nous est donné par la théorie de la chaleur. Autrefois la chaleur formait une branche spéciale bien délimitée de la physique, caractérisée par son rattachement aux données du sens thermique, ce qui suffisait pour qu'on en pût tracer avec précision les frontières. Aujourd'hui, on a retranché de la théorie de la chaleur tout un chapitre sur la chaleur rayonnante, pour le rattacher à l'optique. La sensation thermique n'a donc plus assez d'importance pour réunir en un seul faisceau les débris hétérogènes de ce qui fut l'ancienne

théorie de la chaleur. Nous retrouvons ces débris, en partie dans l'optique (ou dans l'électrodynamique), en partie dans la mécanique, surtout dans cette section de la mécanique qui traité de la théorie cinétique de la matière.

En résumé, ce qui caractérise l'évolution de la physique, c'est une tendance vers l'unité et cette unification s'opère principalement sous le signe d'une certaine libération de la physique, de ses éléments anthropomorphiques et surtout des liens qui la rattachaient à ce qu'il y a de spécifique dans les perceptions des organes de nos sens. Maintenant, si l'on veut bien remarquer que les sensations sont indubitablement à la base de toute recherche, on ne pourra manquer de trouver étonnante et même paradoxale cette aversion de la physique actuelle pour ce qui en est, somme toute, la condition fondamentale. Et pourtant, aucun fait n'apparaît plus clairement dans l'histoire de la physique. Pour se résigner à un pareil reniement de ses origines, ne faut-il pas qu'elle y ait trouvé d'inappréciables avantages !

Avant d'examiner plus en détail ce point important, détournons, pour un instant, nos regards du passé et interrogeons l'avenir. Quelle division sera adoptée par la physique dans les années qui vont suivre ?

Pour le moment, nous nous trouvons encore en présence de deux grands domaines : la mécanique et l'électrodynamique, ou bien encore, la physique de la matière et la physique de l'éther. La première renferme aussi l'acoustique, la théorie de la conductibilité thermique et les phénomènes chimiques ; la

seconde renferme le magnétisme, l’optique et la chaleur rayonnante. Cette division est-elle définitive ? Je ne le crois nullement et, cela, parce qu’il n’y a pas de frontières précises entre ces deux domaines.

Les phénomènes de l’émission lumineuse, par exemple, appartiennent-ils à la mécanique ou à l’électrodynamique ? Autre exemple : à quel domaine convient-il de rattacher le mouvement des électrons ? Au premier abord, on serait tenté de répondre : à l’électrodynamique ; car la matière pondérable ne joue aucun rôle dans les électrons. Mais si l’on considère, par exemple, le mouvement des électrons dans les métaux, on verra que les travaux de H. A. Lorentz, entre autres, lui appliquent des lois qui ressemblent bien davantage à celles de la théorie cinétique des gaz qu’à celles de l’électrodynamique.

Ainsi donc la vieille opposition entre la matière et l’éther semble être en train de s’estomper peu à peu. L’électrodynamique et la mécanique sont loin de s’opposer irréductiblement, quoi qu’en pensent les gens qui vont répétant, un peu partout, que nous assistons au duel de la conception mécanique et de la conception électrodynamique de l’univers. Pour donner une base à la mécanique, il suffit des notions de temps, d’espace et de « ce qui se meut », peu importe que ce soit une « substance » ou un « état » ; or l’électrodynamique, elle aussi, ne peut aucunement se dispenser de faire appel à ces notions. Il en résulte qu’une généralisation convenable du concept de mécanique suffirait à y faire rentrer l’électrodynamique. D’ailleurs il y a bien des indices que les

deux domaines en question, déjà partiellement confondus, finiront par fusionner entièrement dans une seule et même dynamique générale.

Si l'on parvient à surmonter l'opposition de la matière et de l'éther, quel sera alors le point de vue auquel on se placera pour établir des subdivisions à l'intérieur de la physique ? D'après ce que nous avons dit plus haut, c'est là une question qui intéresse toute l'évolution future de notre science. Mais pour y répondre il faut, auparavant, que nous approfondissions davantage ce qui appartient en propre aux principes de la physique.

II

Pour cela, il convient, en premier lieu, de remonter jusqu'au point de départ, je veux dire jusqu'à la première démarche faite dans le but de réaliser l'unité de la physique : unité jusqu'alors, simple postulat philosophique. Ce premier pas a été la découverte du principe de la conservation de l'énergie. La notion d'énergie est, en effet, avec les notions de temps et d'espace, la seule qui soit commune à toutes les branches de la physique. Il est donc naturel que ce principe, avant de recevoir la forme générale que lui ont donnée Lothar Mayer, Joule et Helmholtz, ait eu, lui aussi, un caractère anthropomorphique. Il repose en effet sur la simple constatation qu'il est impossible à l'homme de tirer de rien, un effet utile. Cette constatation résume le résultat des expériences faites en vue de résoudre un problème technique : celui du mouvement perpétuel. Comme

autrefois l’art des faiseurs d’or, la recherche du mouvement perpétuel a entraîné des conséquences allant très loin, avec cette différence, cependant, que ce furent les échecs et non pas les résultats positifs obtenus, qui tournèrent au profit de la science.

Aujourd’hui, on formule le principe de la conservation de l’énergie sans faire aucunement appel à un point de vue anthropomorphique ou technique. Nous disons que l’énergie totale d’un système clos est une grandeur qui ne peut être ni diminuée ni augmentée par aucun des phénomènes qui se passent à l’intérieur de ce système et n’avons aucunement l’idée de faire dépendre l’exactitude de notre postulat du plus ou moins de perfection atteint par les méthodes dont nous disposons pour vérifier si tel mouvement est, oui ou non, un mouvement perpétuel. Strictement parlant la généralisation de principe l’a rendu indémontrable, mais il ne s’en impose qu’avec plus de force. Or, c’est en cela précisément que consiste la libération de l’anthropomorphisme dont il a été question plus au

Nous voyons donc aujourd’hui le principe de la conservation de l’énergie faire figure de construction pleinement autonome, après qu’ont été coupés les liens qui le rattachaient aux contingences ayant présidé à sa naissance. Au contraire, pour le principe de Clausius, dont on a fait le second principe de la thermodynamique, il est loin d’en être de même, du moins dans une aussi large mesure ; et voilà, précisément, ce qui en fait l’intérêt au point de vue qui nous occupe. Nous voyons en effet

ce principe pour ainsi dire non encore complètement dépouillé de la gangue où il était enrobé à l'origine de son développement.

Le second principe de la thermodynamique, du moins tel qu'on le comprend le plus ordinairement, possède, actuellement encore, un caractère anthropomorphique des plus nets. Il y a encore nombre de physiciens éminents qui croient que sa légitimité dépend du fait qu'il est impossible à l'homme de pénétrer dans les détails de la complexité du mouvement moléculaire, c'est-à-dire d'accomplir ce que peuvent faire les démons de Maxwell. On sait que ces derniers sont capables de séparer, dans un gaz, les molécules lentes des molécules rapides, et cela sans fournir le moindre travail, en soulevant simplement de temps en temps un petit volet. Mais il n'est pas besoin d'être prophète pour prédire avec certitude que le second principe, n'ayant au fond rien à voir avec les capacités humaines, on ne fera dans sa formule définitive aucune allusion à la possibilité d'exécution d'aucun processus naturel par les ressources de l'art humain. Nous espérons même que les considérations qui vont suivre ne seront pas sans contribuer quelque peu à libérer tout élément anthropomorphique le second principe.

Examinons d'abord, d'un peu près, la signification de ce dernier et cherchons les liens qui le rattachent au principe de la conservation de l'énergie. Le principe de la conservation de l'énergie déclare qu'il n'y a de possibles, parmi les phénomènes naturels, que ceux où il n'y a ni création ni

anéantissement, mais simplement transformation d’énergie ; le second principe, allant plus loin, dit que toutes les transformations d’énergie ne sont pas possibles mais seulement un certain nombre d’entre elles et dans certaines circonstances. Par exemple, le travail mécanique est susceptible de se transformer en chaleur sans restrictions, comme il arrive dans le cas du frottement ; mais la transformation inverse, c’est-à-dire celle de la chaleur en travail, ne peut, au contraire, être accomplie que sous certaines conditions limitatives. Si la seconde transformation était possible sans restrictions, on pourrait utiliser la chaleur du globe terrestre, qui est proprement inépuisable, pour faire marcher un moteur et ce moteur aurait même, par surcroît, l’avantage de fonctionner comme une machine frigorifique, car le sol se refroidirait tandis qu’il marcherait.

L’impossibilité, démontrée expérimentalement, de construire un tel moteur (appelé aussi « *perpetuum mobile* de seconde espèce ») entraîne nécessairement comme conséquence qu’il y a dans la nature des processus qui ne peuvent en aucune façon être réversibles. Si l’on pouvait, par exemple, rendre complètement réversible le phénomène de frottement par le moyen duquel du travail est transformé en chaleur, quelle que soit d’ailleurs la complexité de l’appareillage nécessaire pour cela, on n’aurait, en somme, rien fait d’autre que de réaliser le moteur dont nous venons de parler, c’est-à-dire le « *perpetuum mobile* de seconde espèce ». Il est, par suite, évident que le seul effet accompli par cet appareil serait de transformer de la chaleur en travail et cela sans que, la transformation une fois

achevée, aucun objet n'ait subi, par ailleurs, de modification permanente.

Si nous appelons irréversibles, tous les phénomènes qui, comme les précédents, ne peuvent être inversés en aucune manière et réversibles, tous les autres phénomènes, nous aurons exprimé tout l'essentiel du second principe en disant qu'il y a des phénomènes irréversibles dans la nature. Il s'ensuit que l'ensemble des changements qui ont lieu dans l'univers est tel qu'il en résulte une progression dans un sens déterminé. En d'autres termes, à chaque transformation irréversible, le monde fait un pas en avant dont il est impossible d'effacer la trace de quelque manière que l'on s'y prenne. Le frottement, la conductibilité thermique, la diffusion, la conductibilité électrique, l'émission de la lumière, la chaleur rayonnante, la destruction des atomes dans les substances radioactives sont des exemples de phénomènes irréversibles. Au contraire, le mouvement des planètes, la chute libre des corps dans le vide, les oscillations pendulaires non amorties, la propagation des ondes lumineuses et sonores sans absorption ni diffraction, les oscillations électriques non amorties sont des exemples de phénomènes réversibles. Tous ces phénomènes, ou bien sont déjà par eux-mêmes périodiques, ou bien sont susceptibles d'être inversés au moyen de dispositifs appropriés, par exemple la chute d'un corps est susceptible d'être inversée, car on peut utiliser la vitesse acquise de ce corps pour le ramener à son niveau primitif, de même, une onde lumineuse ou sonore peut se réfléchir intégralement si on la reçoit, comme il convient, sur un miroir parfait.

Quelles sont maintenant les propriétés générales et caractéristiques des phénomènes irréversibles ? Comment s'y prendre pour apprécier quantitativement le degré d'irréversibilité d'un phénomène, celle-ci étant prise dans son acception la plus générale ? Cette question a été envisagée des points de vue les plus divers et on l'a résolue de bien des façons. C'est pourquoi son étude va nous permettre de scruter d'une manière singulièrement efficace le mécanisme interne typique qui règle l'évolution de toutes les grandes théories physiques.

De même qu'autrefois le problème technique du mouvement perpétuel a mis sur la voie de la découverte du principe de la conservation de l'énergie, de même, plus tard, un autre problème d'ordre technique, celui de la machine à vapeur, a permis de préciser la distinction entre les phénomènes réversibles et les phénomènes irréversibles. Déjà Sadi Carnot se rendait compte que les processus irréversibles sont moins avantageux économiquement que les processus réversibles (bien qu'il se fit une idée inexacte de la nature de la chaleur), car, dans un processus irréversible, on laisse inutilisée une certaine possibilité théorique de produire du travail mécanique en dépensant de la chaleur. De cette remarque à l'idée de prendre pour mesure de l'irréversibilité d'un phénomène la proportion de travail mécanique qui doit être considérée comme perdue définitivement (ce travail perdu étant nul dans les phénomènes réversibles) il n'y avait qu'un pas.

Mais cette définition, si elle a effectivement rendu des services dans certains cas, par exemple dans le cas des phénomènes isothermes, est cependant inutilisable si l'on se place à un point de vue tout à fait général et elle conduit même à des erreurs. Étant donné un phénomène irréversible, on ne peut, en effet, définir d'une manière précise le travail perdu, tant qu'on ne peut pas indiquer exactement quelle est la source d'énergie qui aurait dû fournir le travail en question.

Un exemple fera mieux comprendre ce qui précède. La conductibilité thermique est un phénomène irréversible ; car, pour parler comme Clausius, la chaleur ne peut pas passer, sans compensation, d'un corps froid à un corps plus chaud. Quel est donc le travail qui est perdu quand la quantité de chaleur Q (supposée petite) passe par conductibilité d'un corps chaud ayant la température T_1 à un corps froid ayant la température T_2 ? Pour répondre à cette question nous utiliserons ce transport de chaleur dans un cycle réversible de Carnot dont les deux sources de chaleur seront précisément les deux corps en question. Or on sait qu'un cycle de Carnot se boucle en produisant du travail, ce travail est donc égal à celui qui est perdu quand la chaleur passe directement par conductibilité de la source chaude à la source froide. Toutefois il n'est susceptible d'aucune mesure définie tant qu'on ne sait pas d'où il provient ; dans le cas présent est-ce de la source chaude ou de la source froide ? Il ne faut pas oublier, en effet, que dans le cycle réversible de Carnot la chaleur cédée par le corps chaud n'est pas du tout égale à celle qui a été reçue par le corps froid car il y a une certaine fraction de cette chaleur

totale qui a été convertie en travail. Il est donc tout aussi légitime de considérer la chaleur transportée pendant un cycle de Carnot comme étant égale à la chaleur reçue par le corps froid que de l'identifier à celle qui a été cédée par le corps chaud. Dans le premier cas le travail perdu par conductibilité simple sera :

$$Q \times T_1 - T_2/\overline{T_2}$$

dans le second :

$$Q \times T_1 - T_2/\overline{T_1}$$

Clausius s'est d'ailleurs parfaitement rendu compte qu'il y avait là une indétermination irréductible, c'est pourquoi il a généralisé le cas du cycle de Carnot simple en admettant l'existence d'un troisième réservoir dont la température est tout à fait indéterminée, qui fournit donc un travail non moins indéterminé.

L'artifice proposé plus haut pour trouver une expression mathématique de l'irréversibilité d'un phénomène ne nous a donc pas conduit au but et nous savons maintenant pourquoi : c'est que le problème a été posé en termes trop anthropomorphiques. On s'est trop placé pour le résoudre au point de vue des besoins de l'homme pour lequel produire du travail utile est-ce qui importe avant tout. Pour obtenir de la nature une réponse appropriée, il faut la considérer d'un point de vue plus général en faisant abstraction des préoccupations économiques. C'est ce que nous allons tenter de faire maintenant.

Considérons l'évolution d'un phénomène naturel quelconque. Tout phénomène de ce genre amène les corps qui y prennent part d'un certain état initial A à un état final B. Le phénomène considéré est réversible ou bien il est irréversible ; mais il n'y a aucune autre hypothèse possible. Dès lors l'irréversibilité ou la réversibilité du phénomène dépendent uniquement de la nature constitutive de l'état initial et de celle de l'état final et non pas de la façon dont le phénomène s'est déroulé entre ces deux états extrêmes. Il ne s'agit, en effet, que de savoir si, une fois que l'état B est atteint, il est encore possible, d'une manière quelconque, au système de reprendre intégralement l'état A. Si le retour intégral à l'état A est impossible, c'est-à-dire si le processus est irréversible, c'est que l'état B possède une certaine propriété en vertu de laquelle il jouit d'une sorte de précellence naturelle sur l'état A. J'ai exprimé ceci, il y a déjà bien longtemps, en disant que la nature a plus de propension pour l'état B que pour l'état A. En se plaçant à ce point de vue, il ne peut donc exister de processus dont l'état final serait un objet d'attrait moindre pour la nature que l'état initial. Les changements réversibles sont un cas limite dans lequel la nature a autant de propension pour l'état initial que pour l'état final ; c'est pourquoi le passage est possible de l'un à l'autre dans les deux sens. Maintenant il n'y a plus qu'à trouver une grandeur physique susceptible de pouvoir servir à mesurer, d'une manière tout à fait générale, la préférence qu'a la nature pour un état donné. Cette grandeur devra être déterminée immédiatement par l'état du système considéré, sans qu'on ait besoin de connaître quoi que ce soit de son histoire antérieure.

Elle ressemblera donc en cela à l’énergie, au volume et aux autres caractéristiques de ce système. D’autre part, elle devra posséder la particularité de croître toutes les fois que le système subira une transformation irréversible tandis qu’elle restera constante pour toutes les transformations réversibles. Ces conditions étant remplies, on pourra évidemment dire que la variation de la grandeur en question lors d’une transformation, est une mesure de l’irréversibilité de cette transformation.

Or Clausius à découvert la grandeur dont il s’agit et il lui a donné le nom d’*entropie*. Tout système formé par des corps dans un état quelconque possède une entropie déterminée et cette entropie représente le degré de préférence qu’a la nature pour la réalisation de cet état. Quelles que soient les modifications internes dont le système peut être le siège, l’entropie ne peut que croître, jamais diminuer. Si l’on avait affaire à une succession de phénomènes comprenant des modifications dues à des influences venant de l’extérieur ; il suffirait de faire entrer dans le système les corps exerçant ces influences pour que l’on puisse appliquer le postulat sous la forme que nous venons de lui donner. En outre, l’entropie d’un système de corps est égale à la somme des entropies de chacun des corps particuliers dont il se compose ; et l’entropie d’un corps donné peut être calculée par la méthode de Clausius au moyen d’un certain cycle réversible. Si un corps reçoit de la chaleur, son entropie augmente d’une quantité égale au quotient de la chaleur reçue par la température du corps, par contre, une simple compression ne modifie pas l’entropie.

Revenons à l’exemple cité plus haut où un corps de température T_1 envoie par conductibilité de la chaleur à un corps de température T_2 ; l’entropie de ce corps aura diminué, celle du corps froid aura augmenté, la somme des deux variations c’est-à-dire l’entropie totale du système aura pour valeur :

$$- Q/T_1 + Q/T_2 > 0$$

C’est là une grandeur positive et elle donne sans la moindre ambiguïté la mesure de l’irréversibilité dans le cas de la conductibilité. Il serait d’ailleurs facile de citer d’innombrables exemples du même genre. Tout phénomène chimique, notamment, conviendrait dans ce but.

Le second principe de la thermodynamique avec toutes ses conséquences est donc devenu le principe de l’augmentation de l’entropie. Vous comprendrez maintenant pourquoi, répondant à la question que je posais tout à l’heure touchant la façon dont la physique sera subdivisée à l’avenir, je dis, qu’à mon avis, les phénomènes physiques se partageront en deux grandes classes ; les phénomènes réversibles et les phénomènes irréversibles.

Effectivement tous les phénomènes réversibles, qu’ils aient lieu dans ln matière, dans l’éther ou dans les deux à la fois, se ressemblent beaucoup plus entre eux qu’ils ne ressemblent à un phénomène irréversible quelconque. Un simple examen de la forme des équations différentielles qui régissent chaque catégorie de phénomène suffirait à nous en convaincre. Dans les équations différentielles des phénomènes réversibles, la

différentielle du temps ne figure qu'à des puissances paires, car dans une transformation réversible on peut à volonté changer le signe algébrique du temps. Ceci est vrai des oscillations pendulaires comme des oscillations électriques, des ondes optiques et acoustiques, des mouvements de points matériels et d'électrons dans lesquels on ne peut déceler d'amortissement. Dans la même catégorie, on peut ranger aussi les transformations infiniment lentes envisagées par la thermodynamique (qui ne sont à vrai dire que des séries d'états d'équilibre) dans lesquels le temps ne joue absolument aucun rôle et peut être considéré comme figurant à la puissance 0. D'autre part, tous les phénomènes réversibles ont encore ceci de commun qu'ils obéissent intégralement, comme Helmholtz l'a montré, au principe de moindre action. Ce principe permet de donner des solutions quantitatives exactes aux problèmes les concernant, du moins dans la mesure où l'on peut considérer la théorie des phénomènes réversibles comme définitivement acquise.

Par contre, tous les phénomènes réversibles présentent l'inconvénient de n'être qu'idéals. Dans la nature il n'existe pas un seul phénomène de ce genre car tous les phénomènes naturels sont plus ou moins inséparables de frottements ou de transports de chaleur. Or dans le domaine des phénomènes irréversibles, le principe de la moindre action ne suffit plus. Le principe de l'augmentation de l'entropie introduit, en effet, dans l'univers physique un élément nouveau qui est, de soi, étranger au principe de moindre action. Le second principe requiert donc, pour son application, des considérations

mathématiques d'un genre spécial, car il est chargé de traduire la propriété la plus générale des phénomènes irréversibles : celle de tendre vers un état final définitif.

Il ressortira, je l'espère, des considérations qui précèdent que le contraste existant entre les phénomènes irréversibles et les phénomènes réversibles est bien plus profond que celui qui oppose, par exemple, les phénomènes mécaniques et les phénomènes électriques. C'est donc, semble-t-il, à juste titre, qu'il convient de le mettre à la base de la division la plus générale des phénomènes physiques ; et voilà pourquoi on peut s'attendre à voir la distinction entre ces deux genres de phénomènes jouer le rôle principal dans la physique future.

Néanmoins la classification qui vient d'être exposée a besoin d'une amélioration essentielle. Il est en effet indéniable que, même sous la forme que nous venons de lui donner, la systématique physique est encore fortement entachée d'anthropomorphisme. Dans la définition de l'entropie nous avons eu recours, en effet, à l'idée de « réalisabilité » de certains changements dans l'univers, ce qui revient, en fin de compte, à rendre la classification des phénomènes physiques dépendante du plus ou moins d'efficacité de la technique expérimentale humaine ; or la perfection de cette dernière, bien loin d'être immuable, progresse sans cesse.

Si, donc, il est nécessaire de trouver une définition des phénomènes réversibles et des phénomènes irréversibles valable pour tous les temps, il importe d'approfondir celle que nous venons de donner et notamment de la désolidariser d'avec

tout ce qui a trait aux facultés humaines. Comment y arriver ? c’est ce que nous allons montrer.

III

Notre première définition de l’irréversibilité était vicieuse, comme nous l’avons déjà dit, parce qu’elle suppose l’existence d’une limite déterminée pour les capacités humaines. Or il n’y a rien, en réalité, qui puisse permettre de déceler l’existence d’une telle limite. Au contraire, nous voyons le genre humain tendre de toutes ses forces à reculer toujours plus loin les bornes de l’efficacité de son effort ; et nous espérons que, parmi les choses tenues aujourd’hui pour impossibles, il y en aura beaucoup qui se feront demain. On pourrait alors se demander si un phénomène qui a toujours été jusqu’à présent considéré comme irréversible, ne pourrait être reconnu plus tard comme étant en réalité réversible, par suite d’une invention nouvelle. Ceci entraînerait inévitablement la ruine du second principe de la thermodynamique, car l’irréversibilité d’un seul phénomène conditionne, on peut s’en convaincre facilement, celle de tous les autres.

Prenons un exemple concret : le mouvement tremblotant, si singulier et si facilement observable, exécuté par de petites particules suspendues dans un liquide dénommé mouvement brownien, est regardé selon les théories les plus récentes comme la conséquence des chocs des molécules du liquide contre les particules. Or si l’on pouvait, sans faire une dépense appréciable de travail, au moyen d’un dispositif extrêmement

délicat, arriver à disposer et à diriger séparément chacune de ces particules de telle sorte que le mouvement brownien de désordonné devint ordonné, on aurait, sans aucun doute, trouvé le moyen de transformer sans compensation la chaleur du liquide en une force vive, appréciable, par des moyens grossiers, donc utilisables, ce qui est en pleine contradiction avec le second principe. Admettre la possibilité d'un tel dispositif serait détrôner le postulat de Carnot-Clausius de son rang de principe, en même temps qu'on le rendrait dépendant des progrès de la technique expérimentale. Pour lui conserver sa signification principielle, un seul moyen reste alors : c'est de formuler la notion d'irréversibilité de façon à la rendre indépendante de toute considération anthropomorphique.

La notion d'irréversibilité se ramène à celle d'entropie, tout phénomène irréversible étant lié à une augmentation d'entropie. Tout revient donc à perfectionner la définition de l'entropie. Conformément à la définition primitive de Clausius, l'entropie se mesure par l'intermédiaire d'un certain cycle réversible. La faiblesse de cette définition consiste précisément dans le fait qu'il est absolument impossible de réaliser un phénomène rigoureusement réversible. On pourrait, à la rigueur, objecter que dans le cas présent, il ne s'agit pas de processus réels exécutés par un physicien réel mais seulement d'expériences idéales, purement imaginaires pour ainsi dire, que seul pourrait exécuter un physicien idéal capable de mettre en œuvre la méthode expérimentale avec une exactitude rigoureusement parfaite. Mais nous retombons encore sur la même difficulté : quelle portée convient-il d'attribuer aux

mesures idéales de ce physicien idéal ? À la rigueur, on peut comprendre, à l'aide d'une sorte de passage à la limite, qu'on puisse comprimer un gaz en exerçant sur lui une pression égale à sa pression interne, ou encore qu'on élève la température de ce gaz en prenant de la chaleur à une source ayant la même température que lui. Mais il semble déjà bien plus difficile d'admettre qu'on puisse liquéfier réversiblement une vapeur saturée par compression isotherme sans que jamais la substance cesse d'être homogène, et c'est ce que l'on admet cependant dans certaines théories de la thermodynamique.

Toutefois, c'est en chimie physique que la fantaisie accordée au physicien dans ses expériences idéales semble être poussée le plus loin. À l'aide de parois semi-perméables (réalisables seulement dans certaines circonstances bien spéciales et d'une manière tout à fait approximative), nous le voyons séparer réversiblement, non seulement les molécules des espèces les plus diverses, peu importe qu'elles soient dans un état stable ou labile ; mais encore les ions possédant des charges de signes contraires, sans se soucier des forces électrostatiques énormes qui s'opposeraient à cette séparation, ni du fait qu'il y a des molécules qui continuent à se dissocier pendant que la séparation s'accomplit, tandis qu'une partie des ions se condense en molécules neutres. Pourtant c'est à des artifices de ce genre qu'il faut absolument avoir recours pour comparer l'entropie des molécules non dissociées à celles des molécules dissociées, si l'on veut appliquer la définition de Clausius. L'étonnant, dans ces conditions, c'est de voir les résultats

expérimentaux, confirmer, malgré tout, de pareilles audaces théoriques.

Si maintenant on examine les résultats, on s'aperçoit qu'ils ne dépendent en aucune manière de la possibilité d'exécution réelle des processus idéaux, car ils ne sont en définitive que des relations entre des grandeurs naturelles, comme la température, la chaleur de réaction, la concentration, etc. Aussi ne peut-on s'empêcher de conjecturer que l'admission, à titre d'intermédiaires, des processus idéaux, n'a, ou fond, pas d'autre signification que celle d'un détour pour résoudre un système d'équations. Le véritable contenu du principe de l'augmentation de l'entropie avec toutes les conséquences qu'il entraîne peut donc être désolidarisé entièrement de la notion d'irréversibilité sous sa forme primitive, c'est-à-dire de l'idée de l'impossibilité du « *perpetuum mobile* » de seconde espèce, tout comme le principe de la conservation de l'énergie a pu être désolidarisé de l'idée de l'impossibilité du « *perpetuum mobile* » de première espèce,

L'œuvre scientifique de Ludwig Boltzmann a été consacrée tout entière à faire franchir à la thermodynamique le pas décisif qui devait libérer le concept d'entropie de toute dépendance à l'égard de la technique expérimentale, c'est pourquoi cette œuvre a fait du postulat de Clausius un véritable principe. Nous la résumerons en disant qu'elle a consisté d'une manière générale, à ramener le concept d'entropie à celui de probabilité. Telle est la raison pour laquelle j'ai employé plus haut le mot de « préférence » en disant que la nature avait de la

« préférence » pour un certain état. La nature préfère les états les plus probables aux autres, moins probables, en ne réalisant que des transformations allant dans le sens d'une augmentation de la probabilité. Si la chaleur se propage d'un corps à température élevée vers un autre plus froid, c'est qu'un état où la distribution de la température est uniforme est un état plus probable que celui où il y a des inégalités de température.

La théorie atomique, en introduisant les considérations statistiques, permet, étant donné un état pris par un système de corps, de calculer la valeur de la probabilité de cet état. Quant aux actions que les atomes exercent les unes sur les autres, elles suivent les lois générales de la mécanique et de l'électrodynamique qui demeurent inchangées.

En se plaçant à ce point de vue, le second principe cesse d'occuper une place à part et la préférence qu'a la nature pour certains états perd ce qu'elle avait de mystérieux ; le principe de l'augmentation de l'entropie devient une conséquence de l'introduction de l'atomistique en physique, en tant qu'il résulte d'une application parfaitement légitime du calcul des probabilités à cette dernière.

Il importe cependant de ne pas se le dissimuler, ce nouveau progrès dans l'unification de nos conceptions de l'univers a dû être payé de quelques sacrifices. Le principal est la renonciation à répondre à toutes les questions portant sur le détail des phénomènes physiques, cette renonciation est inhérente à l'adoption du point de vue statistique en vertu de quoi on ne parle, en effet, plus que de valeurs moyennes et on

ne dit plus rien de chacun des éléments pris à part, dont se compose cette moyenne.

L'introduction de liens causals de deux sortes différentes pour rendre compte des phénomènes physiques nous semble être un autre inconvénient sérieux ; car, d'une part, nous avons une nécessité rigoureuse et de l'autre une simple probabilité. Si un liquide pesant au repos tend à avoir le plus bas niveau possible, cela est nécessaire, d'après le principe de la conservation de l'énergie, car un corps ne peut se mettre en mouvement que si son énergie cinétique augmente, donc si son énergie potentielle diminue, c'est-à-dire si son centre de gravité s'abaisse. Par contre, si un corps chaud cède de la chaleur à un corps plus froid, il ne s'agit là que d'une énorme probabilité et non pas d'une nécessité absolue. On peut en effet parfaitement concevoir un arrangement spécial des atomes ayant des vitesses telles qu'il s'en suivrait exactement le contraire. D'ailleurs Boltzmann tire de ses théories la conclusion que des phénomènes étranges tout à fait contraires au second principe de la thermodynamique peuvent parfaitement se produire et il leur assigne une place dans son système de l'univers.

Toutefois, à mon avis, il n'y a pas lieu de le suivre sur ce point. Un univers où se passeraient des choses aussi étranges que le reflux de la chaleur d'un corps froid vers un corps plus chaud ou la démixtion spontanée de deux gaz ayant diffusé l'un dans l'autre, ne serait plus notre univers. Tant que nous aurons affaire à ce dernier, il convient de ne pas admettre ces processus étranges et de rechercher au contraire quel est l'état

de choses très général qui s'oppose à des réalisations de ce genre dans la nature. Cette condition générale, Boltzmann, lui-même, l'a formulée, en ce qui concerne la théorie des gaz, en posant son hypothèse du « désordre élémentaire ». Cette hypothèse revient, en somme, à admettre que les éléments sur lesquels opère la statistique agissent tout à fait indépendamment les uns des autres. Cette condition, une fois introduite, la nécessité se trouve rétablie dans le cours des choses ; car il suffit alors d'appliquer les règles du calcul des probabilités pour en déduire la loi de l'augmentation de l'entropie comme une conséquence directe. On peut donc dire que le second principe de la thermodynamique est essentiellement le principe du « désordre élémentaire ». Sous cette forme il est tout aussi impossible à ce principe de mener à une contradiction que cela est impossible au calcul des probabilités dont il a été déduit.

Quelle est maintenant la relation qui existe entre la probabilité d'un système et son entropie ? On peut la déduire de la simple remarque que la probabilité de deux systèmes indépendants est égale au produit des probabilités de chacun des systèmes composants ($W = W_1 W_2$) ; tandis que l'entropie totale est égale à la somme des entropies partielles. L'entropie est donc proportionnelle au logarithme de la probabilité ($S = k \ln W$).

Ce théorème va nous fournir une méthode pour calculer l'entropie dont la portée dépasse de loin celle des anciens artifices de la thermodynamique. La nouvelle définition de l'entropie peut, notamment, s'étendre à n'importe quel état

dynamique et non pas aux seuls états d'équilibre, habituellement étudiés par la thermodynamique. De plus, pour calculer la valeur de l'entropie, il n'est plus nécessaire de considérer, comme le faisait Clausius, un système qui parcourt un cycle fermé, cycle dont la possibilité de réalisation paraît toujours plus ou moins douteuse. Enfin, comme conséquence de cette indépendance de tout artifice, la nouvelle définition se trouve être purgée de tout anthropomorphisme ; c'est pourquoi elle est susceptible de donner un fondement réel au second principe de la thermodynamique.

Nous la voyons se montrer féconde, non seulement dans la théorie cinétique des gaz, mais encore dans celle de la chaleur rayonnante ; dans tous ces domaines elle a permis la déduction de lois qui ont été vérifiées par l'expérience. Tout corps qui rayonne de la chaleur en perd ; son entropie diminue donc et ceci suffit à prouver que la chaleur rayonnante a aussi une entropie. En effet, l'entropie d'un système ne peut que croître, il faut donc qu'au moins une partie de l'entropie soit contenue dans la chaleur rayonnante, aussi un rayon monochromatique a-t-il une température déterminée qui ne dépend que de son intensité ; cette température est celle du corps noir qui émet des rayons de la même intensité. La principale différence entre le cas de la chaleur rayonnante et celui de la théorie cinétique des gaz est que les éléments dont le désordre entraîne l'existence d'une entropie ne sont plus ici des atomes, mais les vibrations partielles en nombre extraordinairement élevé dont se compose, il ne faut pas l'oublier, toute émission de lumière, même la plus homogène.

En outre, il y a un fait particulièrement remarquable, en ce qui concerne le rayonnement thermique : c'est que les constantes qui y figurent sont des constantes universelles comme la constante de la gravitation, car elles n'ont aucune relation avec un corps particulier, quel qu'il soit. À l'aide de ces constantes, on pourrait donc déterminer des unités de longueur, de masse, de temps et de température nécessairement valables pour tous les temps et pour toutes les civilisations, même extra-terrestres, bien plus, même extra-humaines, ce qui n'est aucunement le cas des unités de notre système de mesures actuel. Le centimètre, par exemple, est en rapport avec la circonférence actuelle de la terre ; la seconde, avec la durée actuelle de la révolution terrestre ; le gramme, avec l'eau qui est le corps le plus répandu à la surface de la terre ; la température, par les points fixes de l'échelle thermométrique, est en relation avec les changements d'état de cette même eau. Au contraire les constantes en question sont telles que les habitants de Mars et même tout être intelligent, doit fatalement les rencontrer au cours de ses calculs, s'ils ne les à pas déjà trouvées.

Je n'ajouterai qu'une dernière remarque, extrêmement importante, il est vrai ; cette remarque se rattache à la liaison qui a été établie entre les notions d'entropie et celle de probabilité. Nous avons cité plus haut le théorème d'après lequel la probabilité du système résultant de la réunion de deux systèmes est le produit de la probabilité de chacun des deux systèmes composants ; or ce théorème ne s'applique que dans le cas de deux systèmes indépendants, cette indépendance étant prise dans le sens où l'on entend ce terme dans le calcul des

probabilités. S'il n'en est pas ainsi, la probabilité résultante ne sera plus égale au produit des probabilités partielles. Il est donc plausible qu'il y ait des cas où l'entropie totale d'un système ne soit pas égale à la somme des entropies propres aux différentes parties de ce système et, effectivement, Max Laue a prouvé qu'on pouvait trouver dans la nature des exemples de phénomènes où il en était bien ainsi. Deux rayons lumineux totalement ou partiellement cohérents (c'est-à-dire deux rayons qui proviennent de la même source) ne sont pas indépendants l'un de l'autre, au point de vue du calcul des probabilités, car les vibrations élémentaires dont se composent chaque rayon sont déterminées au moins partiellement par celles de l'autre. Il est donc possible d'imaginer un dispositif optique assez simple permettant à deux rayons cohérents de températures quelconques de se convertir en deux autres présentant une plus grande différence de température. Le vieux principe de Clausius qui veut que la chaleur ne puisse pas passer sans compensation d'un corps froid dans un corps plus chaud ne s'applique donc pas aux rayons thermiques cohérents. Cependant, même dans ce cas, le principe de l'augmentation de l'entropie conserve sa valeur, si l'on tient compte de ce que l'entropie du rayonnement total n'est pas égale à la somme des entropies de chaque rayon composant, mais est plus petite que cette somme.

Le problème posé plus haut de la transformation du mouvement brownien en travail utilisable soulève une remarque tout à fait analogue. Un dispositif qui aurait pour effet de diriger et de mettre en ordre le mouvement des

particules, qu'il soit réalisable techniquement ou non, devrait, en effet, nécessairement posséder une certaine cohérence avec le mouvement particulaire lui-même, ceci étant admis, il ne serait nullement contradictoire avec le second principe de la thermodynamique d'admettre que ce dispositif en fonctionnant puisse produire du travail utilisable. Pour lever la contradiction apparente, il suffirait d'observer qu'on ne doit pas additionner l'entropie propre au dispositif et celle qui est propre au mouvement brownien. On voit par là suffisamment combien il faut être prudent dans le calcul de l'entropie d'un système composé à partir de l'entropie des systèmes composants. Si l'on veut raisonner d'une manière rigoureuse, il faut prendre séparément chacun des sous-systèmes et se demander tout d'abord s'il n'existe pas quelque part ailleurs, dans le système total, un autre sous-système qui soit cohérent avec le premier. S'il en était ainsi les deux sous-systèmes cohérents pourraient bien par leur interaction mutuelle produire des effets tout à fait inattendus, contradictoires en apparence avec le second principe. Si les deux sous-systèmes cohérents n'exerçaient aucune action l'un sur l'autre, on ne commettrait pas d'erreur appréciable en ne tenant pas compte de leur cohérence dans le calcul du comportement du système total.

Toutes ces considérations sur la cohérence un peu bizarres, je l'avoue, ne vous font-elles pas penser, par un rapprochement involontaire, aux interactions mutuelles, si mystérieuses, qui règlent la vie psychique, ces interactions restent la plupart du temps cachées et elles peuvent être ignorées sans inconvénient, ce qui ne les empêche pas, quand les circonstances s'y prêtent,

d’entraîner toute une suite de conséquences qu’on n’aurait pu soupçonner au premier abord.

S’il nous était loisible de nous abandonner ici à notre fantaisie, nous pourrions imaginer, séparés de nous par des distances dont la grandeur échappe à nos mesures, d’autres corps en état de cohérence avec ceux du monde corporel qui nous entoure. Tant que cette séparation se prolongera, tout se passera normalement, mais si un jour venait où il y aurait possibilités d’action mutuelle des deux mondes l’un sur l’autre, il en résulterait inévitablement des exceptions apparentes au second principe de la thermodynamique. Cette hypothèse écarte de notre monde la menace de la mort par congélation, qui lui est réservée, au dire de nombreux physiciens et philosophes. Et du même coup le principe de Carnot-Clausius perdrait le caractère antipathique que l’on lui reconnaît assez habituellement, sans qu’on soit obligé pour cela de mettre en doute sa validité générale. Mais à quoi bon aller chercher si loin quand, un simple regard jeté sur l’extension indéfinie du monde tel qu’il s’offre à nos observations suffit à nous rassurer, sans avoir recours à ces hypothèses quelque peu artificielles, nous pouvons donc tranquillement nous tourner vers d’autres problèmes plus urgents qui attendent de nous que nous les résolvions.

IV

J’ai essayé d’esquisser quelques-uns des traits caractéristiques fondamentaux de l’idée que le physicien futur se fera sans

doute de l’univers. Tournons maintenant nos regards vers le passé et considérons l’évolution des systèmes de l’univers au fur et à mesure que la science progressait. Si nous nous rappelons les caractères principaux de cette évolution tels que nous les avons décrits tout à l’heure nous devons bien convenir que l’image future comparée à la magnificence et à la richesse de couleurs de l’image passée risque de paraître bien terne et bien froide. L’ancienne image reflétait en effet la diversité des besoins humains et tous les genres de sensations spécifiques y avaient apporté leur contribution. L’image moderne au contraire a été dépouillée de tout caractère d’évidence immédiatement tangible et c’est là un grave inconvénient quand on en vient à l’épreuve de la confrontation avec la réalité. En outre, autre circonstance aggravante, il est absolument impossible de se passer complètement de sensations, car on ne saurait couper complètement toute communication avec la source indiscutable de toutes nos connaissances et il ne peut davantage être question d’une connaissance directe de l’absolu.

Quelle particularité remarquable a donc conféré à la conception de l’univers de la physique moderne une supériorité si décisive qu’elle a supplanté tous les systèmes antérieurs, malgré ses inconvénients évidents ? Si nous y réfléchissons nous ne trouvons rien d’autre que le caractère d’unité de cette conception. Cette unité fait rentrer tous les détails dans une vaste synthèse, elle s’étend à tous les lieux, elle vaut pour tous les savants, pour toutes les nations, pour toutes les civilisations.

À y regarder de prés, l'ancienne physique ressemblait davantage à une collection qu'à un portrait unique, chaque classe de phénomènes naturels y avait sa représentation à part et il n'y avait pas de solidarité véritable entre ces diverses représentations. La disparition de l'une d'entre elles n'eût pas affecté sensiblement les autres. Or ceci ne serait pas du tout possible dans le cas de la physique actuelle. Pour elle, aucun fait particulier ne peut être considéré comme négligeable, chaque détail joue son rôle bien déterminé et a son importance pour la description de la nature observable. Inversement tout phénomène observable doit trouver la place qui lui convient exactement dans l'ensemble. La description physique, nous tenons à le faire remarquer, est en cela très différente d'un portrait ordinaire qui n'a jamais la prétention de reproduire d'une manière absolument exacte tous les traits de l'original. On trouve, il est vrai, dans les traités de physique, même les plus récents, des remarques comme celle-ci : la théorie des électrons tout comme la théorie cinétique des gaz, ne donne qu'une image approchée de la réalité. C'est vrai, mais ce serait se méprendre gravement que de s'imaginer que cela veut dire qu'on ne puisse pas exiger que toutes les conséquences de la théorie soient conformes aux résultats de l'expérience.

Lorsque, au milieu du siècle dernier, Rudolph Clausius eut tiré des principes fondamentaux de la théorie cinétique des gaz la conclusion que les molécules des gaz possèdent, dès la température ordinaire, des vitesses qui doivent se chiffrer par centaines de mètres à la seconde, on ne manqua pas de lui objecter que deux gaz diffusent avec une extrême lenteur l'un

dans l’autre et que, dans l’intérieur d’un même gaz, l’égalisation des différences de températures locales n’a lieu que très lentement. Se contenta-t-il alors, pour justifier son hypothèse, de faire remarquer qu’elle n’était qu’une image approchée de la réalité et qu’il ne fallait pas se montrer trop rigoureux ? Bien loin de là, il montra, en faisant le calcul de la trajectoire libre moyenne, que son hypothèse rendait bien compte des faits, même en ce qui concerne les phénomènes qu’on lui opposait. Il savait, en effet, mieux que personne, qu’une seule contradiction définitivement constatée entre les faits et sa théorie, aurait suffit à la faire déchoir du rang qu’elle occupait en physique, et ceci demeure toujours vrai, même à l’heure actuelle.

C’est justement parce que la prétention de la physique moderne de donner une idée générale de l’univers, s’est trouvée justifiée qu’elle à conquis l’assentiment de tous et qu’elle s’est placée au-dessus de l’appréciation plus ou moins bienveillante des savants quelle qu’en soit la nationalité et quelle que soit l’époque où ils vivent. Elle se situe même au-dessus de l’humanité tout entière. On pourra trouver au premier abord mon affirmation bien osée ; on sera même tenté de la tenir pour absurde. Qu’on se souvienne cependant de ce que nous avons dit plus haut au sujet de la physique des habitants de Mars et l’on devra tout au moins convenir que notre généralisation ne dépasse aucunement en portée celles qui sont courantes en physique. Il n’est pas rare, en effet, qu’on y aboutisse à des conclusions qui ne sauraient jamais être vérifiées par aucun observateur humain. Pourtant quiconque prétendrait, pour cela,

contester la légitimité de ces conclusions, renoncerait par là même à penser en physicien.

On ne trouverait pas un physicien à douter qu'il soit légitime d'affirmer qu'un être doué d'intelligence et possédant un organe sensible aux rayons ultra-violets, assimilerait complètement ces rayons aux rayons visibles, bien que personne n'ait jamais vu un rayon ultra-violet, ni un être susceptible de les percevoir. Il n'y a pas de chimiste à douter que l'on doive attribuer au sodium existant dans le soleil les mêmes propriétés chimiques qu'au sodium terrestre, bien qu'il n'ait aucun espoir de pouvoir jamais remplir une éprouvette avec du sodium solaire.

Nous voilà donc amenés à répondre à la question que nous nous posions à la fin du premier paragraphe de cette conférence : la conception de l'univers selon la physique n'est-elle qu'une création arbitraire de notre esprit ou bien devons-nous affirmer, au contraire, qu'il y a des phénomènes naturels tout à fait indépendants de nous ? Ou bien, pour parler d'une façon plus concrète, est-il raisonnable d'affirmer que le principe de la conservation de l'énergie était déjà valable dans la nature avant qu'il y eût des hommes qui pussent y songer ? Doit-on dire que les astres obéiront toujours à la loi de la gravitation, même quand la terre et tous ses habitants auront été réduits en miettes ?

Après tout ce que je viens de dire on comprendra aisément que je réponde affirmativement ; mais je ne me le dissimule pas, ma réponse va, dans une certaine mesure, à l'encontre de

certains courants d'opinion philosophiques auxquels l'autorité d'Ernest Mach a donné beaucoup de prestige, précisément dans les milieux scientifiques. Suivant cette opinion, il n'existe pas d'autre réalité que nos propres sensations et toutes les sciences positives ne sont, en dernière analyse, qu'un essai d'adaptation de nos pensées à nos sensations : adaptation faite d'un point de vue purement économique, sous la pression de la lutte pour la vie. Il en résulte que la ligne de démarcation entre les sciences physiques et la psychologie n'aurait qu'une valeur pratique et toute conventionnelle ; les seuls véritables éléments de l'univers n'étant, en définitive, que des sensations.

Admettons un instant qu'il en soit bien ainsi et référons-nous à ce que nous a appris le coup d'œil circulaire que nous venons de jeter sur l'évolution de la physique, nous ne pourrons alors échapper à la singulière conclusion que la principale caractéristique de cette évolution a été d'éliminer de plus en plus complètement de la physique les éléments dont se compose véritablement l'univers. Pour être conséquent avec lui-même, il aurait fallu en effet que chaque physicien eût pris le plus grand soin de mettre à part sa propre conception de l'univers comme quelque chose d'absolument singulier et de totalement différent de toutes les autres conceptions. S'il arrivait que deux collègues de notre physicien, ayant entrepris indépendamment l'un de l'autre la même expérience, aboutissent à des conclusions tout à fait opposées (cela s'est vu quelquefois), il y aurait de sa part faute de logique, à prétendre que l'un des deux, au moins doit se tromper, car la divergence des conclusions peut très bien provenir de la diversité des

représentations du monde, propres à chacun d'eux. Or, je vous le demande, y eut-il jamais physicien à se laisser aller à raisonner de si étrange façon ?

Je concède, très volontiers qu'une énorme improbabilité ne diffère pratiquement pas d'une impossibilité principielle ; mais je n'en maintiens que plus fermement, contre des attaques venant d'ailleurs toujours du même parti, que la théorie électronique et l'hypothèse atomique sont toutes deux justifiées et qu'elles ne pêchent pas par la base. Allant plus loin, je dirai même, et je ne suis pas le seul, que les atomes si peu que nous connaissons de leurs propriétés ne sont, ni plus ni moins réels que les objets terrestres qui nous entourent. Quand je dis qu'un atome pèse 1,6 × 10−22 grammes, cette phrase ne contient pas une connaissance d'un ordre inférieur à celle qui est contenue dans cette autre : la lune pèse 7 × 1025 grammes. S'il est évident en effet que je ne puis mettre un atome d'hydrogène sur le plateau d'une balance pas plus que je ne puis le voir, est-ce que je puis davantage y poser la lune ? Quant à la visibilité, on sait qu'il existe des astres invisibles dont on a pu cependant déterminer le poids avec plus ou moins d'exactitude. La masse de Neptune, il ne faut pas l'oublier a été mesurée avant qu'aucun astronome n'ait aperçu la planète dans sa lunette. Il n'y a pas de méthode de mesure en physique qui ne comporte une part de connaissance d'ordre inductif. Le moindre coup d'œil jeté sur un laboratoire de précision suffirait en effet à mettre en évidence la somme de lois expérimentales et de raisonnements qui est présupposée à toute mesure, même la plus simple en apparence.

Maintenant nous avons encore à nous demander pourquoi la théorie de la connaissance de Mach a obtenu tant de succès dans le monde scientifique. Si je ne m'abuse, c'est parce que elle est au fond une sorte de réaction consécutive à la déception des vastes espérances conçues par la génération qui nous a précédés après la découverte du principe de la conservation de l'énergie. On peut trouver ces espoirs sous une forme particulièrement explicite, dans les ouvrages de du Bois-Reymond, entre autres. En parlant d'espoirs déçus, je ne veux d'ailleurs pas dire qu'ils n'aient été suivis d'aucune réalisation durable, la théorie cinétique des gaz est un exemple du contraire ; je prétends seulement que l'avenir a montré qu'ils étaient exagérés, car la physique par là même qu'elle a fait appel à la statistique a renoncé à édifier une mécanique complète des atomes. Le positivisme de Mach n'est que le contrecoup sur la philosophie de la désillusion qui devait nécessairement succéder à la période d'enthousiasme.

On doit, certes, lui attribuer pleinement le mérite d'avoir montré dans la perception sensible le seul moyen d'échapper à l'envahissement du scepticisme. Mais il a dépassé la mesure, car en rabaissant les prétentions du mécanisme, il a dégradé en même temps l'idée que la physique doit se faire de l'univers.

Tout convaincu que je sois de ce que le système de Mach, avec toutes les conséquences qu'il comporte logiquement, ne renferme aucune contradiction interne, je n'en suis pas moins persuadé qu'il n'a au fond qu'une signification purement formelle. Il est incapable de pénétrer jusqu'à l'essence de la

science et cela parce qu'il ne tend pas vers ce qui est le but de toute recherche scientifique, je veux dire vers la construction d'un système descriptif de l'univers qui soit rigoureusement stable, indépendant des mutations affectant les générations et les peuples. Le principe de continuité de Mach ne saurait suppléer à ce qui manque à son système à cet égard, car la continuité n'est pas la constance.

Une conception stable de l'univers tel est le but dont toute science véritable, j'ai tâché de le démontrer plus haut, doit tenter de se rapprocher au cours de ses pérégrinations. Il est donc tout à fait légitime d'affirmer, dès maintenant, que notre conception actuelle de l'univers, bien qu'elle revête encore les nuances les plus variées suivant l'individualité des savants, renferme cependant certains traits définitifs qui ne seront jamais détruits par aucune révolution, ni dans la nature, ni dans l'esprit humain. Ce noyau absolument immuable et indépendant de toute individualité, que ce soit celle de l'homme ou celle de tout autre être intelligent, est-ce que nous nommons le réel. En ce sens, y a-t-il aujourd'hui un physicien qui doute sérieusement de la réalité du principe de la conservation de l'énergie ? Ne serait-ce pas, au contraire, la reconnaissance de la réalité de ce principe qui serait la condition *sine qua non* de la validité de tout jugement dans l'ordre scientifique ?

Cependant, s'il s'agissait de savoir jusqu'à quel point on doit se tenir pour assuré que nos conceptions actuelles cadrent bien, au mains en gros, avec l'idée que la physique future se fera de

l’univers, je ne saurais donner aucune réponse générale précise. La plus grande prudence est ici de mise, mais une telle question n’est pour nous que secondaire, ce qui importe, c’est d’avoir montré, qu’il y a un but permanent dont nous nous rapprochons bien que nous ne puissions jamais l’atteindre complètement. Ce but, ce n’est pas d’établir une coordination parfaite entre nos pensées et nos sensations, c’est d’éliminer de nos idées sur l’univers tout ce qui est propre à l’individualité de l’esprit qui les conçoit. En disant ceci, remarquons-le, nous ne faisons que répéter, en le précisant, ce que nous avons exposé plus haut au sujet de l’émancipation de la science de tous ses éléments anthropomorphiques. Cette précision était nécessaire pour éviter tout malentendu ; car il ne faudrait pas comprendre que l’on doive radicalement séparer la représentation du monde, de l’esprit qui conçoit cette représentation : rien ne serait plus insensé.

Pour terminer, nous ajouterons encore un argument susceptible de faire plus d’impression que toutes les considérations objectives précédentes, sur ceux qui s’obstinent à regarder le point de vue économique humain comme le plus important. Lorsque les grands génies des sciences exactes lancèrent leurs idées à travers le monde savant, lorsque Nicolas Copernic, par exemple, enleva à la terre son rôle-de centre du monde, lorsque Jean Kepler formula les lois qui portent son nom, lorsque Isaac Newton découvrit la loi de la gravitation universelle, lorsque son illustre compatriote Christian Huyghens émit l’hypothèse de la nature ondulatoire de la lumière, lorsque Michel Faraday posa les fondements de l’électrodynamique, et je pourrais

allonger encore cette liste, les préoccupations économiques furent certainement au dernier rang des motifs qui entraînèrent ces hommes à soutenir de rudes combats contre les idées traditionnelles et les autorités de leurs temps. Ce qui les encourageait, c'était une foi inébranlable à la conformité de leurs conceptions de l'univers avec la réalité, et cette foi reposait sur des bases esthétiques ou religieuses. Ce fait est de ceux qu'on ne peut pas contester et, en s'appuyant sur lui, on peut prévoir que si le principe d'économie de Mach devenait réellement le fondement de toute théorie de la connaissance, tous les pionniers géniaux qui sont encore à naître, n'y trouveraient qu'une entrave à leur pensée. Les ailes de leur fantaisie se trouveraient coupées et, en fin de compte, le progrès de la science serait compromis d'une façon désastreuse. Dans ces conditions, ne serait-il pas plus « économique » de ne faire au principe d'économie qu'une place un peu plus modeste ? D'ailleurs, comme il ressort de la façon dont j'ai posé ma question, je suis, bien entendu, très loin de penser qu'il faille proscrire ou même négliger toute considération basée sur l'économie, celle-ci étant prise dans son sens le plus élevé.

Mais il y a plus : les grands savants dont je citais les noms tout à l'heure, ne parlaient pas du tout de *leur* conception de l'univers, mais uniquement de la nature de l'univers lui-même. Y a-t-il une différence décelable entre « leur monde » et notre image du monde selon la physique future ? Nullement. Depuis Emmanuel Kant, c'est, en effet, un lieu commun pour tout esprit pensant qu'il n'existe pas de méthode pour se rendre

compte s’il y a où non des différences de ce genre. Si nous avons employé l’expression composée « image de l’univers », c’est qu’elle est devenue usuelle et qu’elle est de nature à mettre en garde contre certaines illusions. Cependant, pourvu que nous prenions les précautions nécessaires, c’est-à-dire que nous ne mettions derrière le mot « monde » rien d’autre que cette image idéale vers laquelle tend l’avenir, nous pouvons sans inconvénient nous contenter de ce simple mot, nous aurons ainsi l’avantage de nous exprimer d’une façon plus réaliste, présentant, même au point de vue économique, une supériorité évidente sur le positivisme de Mach, avec toute sa complication et la difficulté qu’il y a d’y conformer jusqu’au bout la pensée. Notre façon de parler sera d’ailleurs celle de tous les physiciens quand ils emploient la langue de leur science.

CHAPITRE II

VOIES D'ACCÈS NOUVELLES À LA CONNAISSANCE EN PHYSIQUE

Depuis une génération environ, la physique expérimentale s'est prodigieusement développée. Les progrès qu'elle a fait dépassent de loin tout ce qui s'était vu auparavant et, plus que jamais, tout le monde a conscience de l'importance des conséquences de ce progrès pour la civilisation humaine. Les ondes de la télégraphie sans fil, les électrons, les rayons X, les phénomènes de radioactivité intéressent plus ou moins tout le monde. Cependant, si nous nous demandons maintenant dans quelle mesure ces merveilleuses découvertes ont servi à perfectionner notre connaissance de la nature et de ses lois ; il ne semble pas, au premier abord, que nous ayons d'aussi éclatants motifs de satisfaction.

Regardé d'un peu loin et comme d'un observatoire élevé, l'ensemble de la physique théorique moderne, bien loin de nous procurer un sentiment apaisant de sécurité analogue à celui que nous ferait éprouver l'ensemble des spéculations de la période précédente, qualifiée à juste titre de classique, donne au contraire facilement l'impression d'un chaos. Nous voyons les physiciens se débattre un peu à l'aveuglette comme s'ils

étaient déroutés par des découvertes expérimentales trop nombreuses, survenues en même temps, et dont une bonne part étaient totalement imprévues. Partout nous voyons attaquées les opinions anciennes, même les plus solidement enracinées ; les postulats les plus incontestés sont ébranlés et font place à des hypothèses nouvelles. Parmi ces hypothèses, il en est d'une hardiesse telle qu'elles mettent à une épreuve presque insupportable les facultés de compréhension des gens même les plus cultivés en matière scientifique et, en tout cas, elles ne sont pas faites pour développer en nous la conviction que notre science progresse sans cesse d'un pas assuré comme quelqu'un qui sait où il va. En somme, la physique théorique actuelle donne l'impression d'un vieil édifice vénérable, mais vermoulu, dont les murs commencent à s'effriter et dont les fondements même sont menacés de ruine.

Pourtant on aurait complètement tort de céder à cette première impression. Les théories actuelles ont, certes, profondément modifié les idées anciennes ; mais, à y regarder de près, on s'aperçoit que ces changements ne sont pas des destructions, ils sont, bien plutôt, des compléments et des généralisations. On a remué certaines pierres de l'édifice, mais cela a été surtout dans le but de les transporter là où elles étaient mieux à leur place et plus solidement encadrées. C'est pourquoi tous ces remaniements ont eu pour résultat que les véritables fondements de la physique n'ont jamais été aussi solidement assis qu'à l'heure actuelle, comme la suite de ce chapitre va nous permettre de le faire ressortir.

À ce propos, il importe de faire d'abord une remarque d'une portée générale. Lorsqu'il se produit une révision ou une transformation d'une théorie physique, on trouve qu'il y a presque toujours au point de départ la constatation d'un ou de plusieurs faits qui ne pouvaient pas entrer dans le cadre de ln théorie, sous sa forme actuelle. Les faits restent en effet toujours la clef de voûte de laquelle dépend la stabilité de toute théorie, si importante qu'elle puisse être.

Pour le théoricien vraiment digne de ce nom il n'y a d'ailleurs rien de plus intéressant qu'un fait en contradiction avec une théorie jusqu'alors tenue pour vraie, c'est alors que commence pour lui le véritable travail. Que faut-il faire en ce cas ? Évidemment faire subir à l'ancienne théorie un changement tel qu'elle puisse s'accorder avec le fait. Mais sur quel point précis devra porter l'amélioration, c'est ce qu'il est souvent très difficile d'arriver à savoir. Car d'un fait isolé, il est impossible de tirer une théorie. En général, cette dernière se présentera sous la forme de toute une série de propositions s'enchaînant les unes aux autres. On pourrait donc comparer une théorie à un organisme compliqué dont les parties sont liées intimement et de multiples façons, aussi toute attaque portant sur un point aura sa répercussion en plusieurs autres, peut-être très éloignés du premier. On peut donc s'attendre à des contre-coups pas toujours faciles à prévoir. D'autre part, toute théorie étant la résultante de plusieurs propositions, s'il y a un insuccès, il sera en général possible d'en faire remonter la responsabilité à plusieurs et, par suite, il y aura aussi plusieurs moyens de remettre la théorie d'accord avec l'expérience. Ordinairement,

quand on a fini de discuter le problème, on aboutit à deux ou trois propositions ayant jusqu'alors fait bon ménage à l'intérieur de la théorie et dont au moins une doit être sacrifiée pour pouvoir maintenir l'accord avec les faits. La lutte entre ces propositions dure souvent des années, voire des dizaines d'années, et la victoire finale signifie, non seulement l'élimination d'une des propositions, mais aussi, il ne faut pas l'oublier, la consolidation de celles qui ont été victorieuses ; ces dernières acquièrent, par là même, un rang plus élevé.

Or ce qu'il y a de plus remarquable, c'est que dans tous les conflits du même genre qui ont éclaté récemment, tous les grands principes généraux de la physique sont demeurés victorieux. Ainsi en a-t-il été, par exemple, du principe de la conservation de l'énergie, du principe de la conservation de la quantité de mouvement, des principes de la thermodynamique, leur importance est devenue plus grande. Quant aux principes vaincus ils sont des postulats qui semblaient jusqu'alors avoir fourni à la physique une base solide ; mais c'était tout simplement parce qu'ils étaient regardés comme allant de soi, au point qu'on ne jugeait même pas nécessaire de les mentionner spécialement quand on n'oubliait pas tout à fait leur existence.

Si nous avions à résumer brièvement l'évolution la plus récente des théories physiques, nous dirions donc qu'elle est caractérisée par la victoire des grands principes sur des idées, certes profondément enracinées, mais surtout par la force de l'habitude.

Nous allons d’ailleurs maintenant entrer un peu plus dans le détail en disant quelques mots de ces postulats, primitivement considérés comme la base évidente de toute théorie sérieuse et qui furent remis en question plus tard et déclarés difficilement compatibles ou même contradictoires avec les grands principes de la physique par suite de la découverte de faits nouveaux. Je n’en nommerai que trois : le postulat de l’invariabilité des atomes, celui de l’indépendance réciproque du temps et de l’espace, et celui de la continuité de toutes les actions dynamiques.

Je ne puis naturellement avoir l’intention d’exposer ici tous les arguments, pourtant solides, qui combattent l’idée de l’invariabilité des atomes chimiques. Je me contenterai de citer un seul fait qui devait fatalement déclencher un conflit entre l’ancienne idée de l’invariabilité des atomes et un grand principe général de la physique ; je veux dire l’émission de chaleur perpétuelle qui est le propre de tous les composés du radium. Dans ce cas, le principe auquel on se heurte est le principe de la conservation de l’énergie. S’il y a eu, au début du conflit, quelques voix pour mettre en doute la validité de ce principe, nous le voyons remporter aujourd’hui une éclatante victoire.

Un sel de radium enfermé sous une enveloppe de plomb suffisamment épaisse émet continuellement de la chaleur, cette quantité de chaleur est de 135 calories par gramme de radium et par heure. L’échantillon de radium reste donc continuellement plus chaud que son entourage, il en est de lui

comme d’un four qui est chauffé. Mais le principe de la conservation de l’énergie s’oppose à ce que cette chaleur vienne de rien ; elle doit donc être causée par une transformation quelconque équivalente. Dans le cas du four, l’origine de la chaleur dégagée doit être recherchée dans les phénomènes de combustion dont il est le siège. Mais dans le cas du radium, comme il n’y a aucun autre phénomène chimique qui soit possible, il faut bien admettre que l’atome de radium lui-même subit une transformation. D’ailleurs cette hypothèse, malgré sa hardiesse, s’est vérifiée sous tous les rapports.

Certes, au point de vue de la forme stricte du mot, on ne saurait parler d’atomes modifiables, car, en vertu de l’étymologie, le nom d’atome a désigné primitivement les éléments ultimes invariables dont toute matière est formée. On devrait donc réserver le nom d’atome à ce qui est véritablement invariable, c’est-à-dire, peut-être, aux électrons et à l’hydrogène. Mais, sans compter qu’on ne pourra jamais démontrer qu’il existe des éléments invariables au sens absolu du terme, la modification qu’il faudrait apporter aux dénominations actuelles pour les rendre conformes à l’étymologie serait de nature à engendrer des confusions inextricables. Il y a, en effet, bien longtemps que les atomes dont on parle en chimie, n’ont plus rien de commun avec ceux de Démocrite ; leur définition actuelle s’est beaucoup précisée et elle fait intervenir des grandeurs susceptibles de s’exprimer exactement par des nombres. C’est de ces atomes, au sens moderne et d’eux seuls qu’on parle

lorsqu'on dit qu'ils sont transformables, aussi ne saurait-il y avoir aucune espèce de malentendu.

L'indépendance réciproque du temps et de l'espace est également une de ces choses qui allaient de soi encore tout récemment. La question de savoir si deux événements, se passant en deux lieux différents, sont ou ne sont pas simultanés, avait un sens physique défini sans qu'il fût nécessaire de demander quel était l'observateur qui procédait à la mesure du temps. Aujourd'hui il en est autrement. Les expériences les plus délicates d'électrodynamique et d'optique ont élevé au rang de fait bien établi ce que l'on appelle, à vrai dire, d'une manière assez ambiguë, la relativité de tous les mouvements. Or la constatation de ce fait a mis en évidence l'incompatibilité de l'idée primitive d'un temps indépendant de l'espace avec le principe de la constance de la vitesse de la lumière, base de l'électrodynamique de Maxwell-Lorentz. Ce principe veut que la vitesse de la lumière dans le vide soit indépendante du mouvement de la source lumineuse. Si donc on admet la relativité comme expérimentalement démontrée, il faut sacrifier, soit l'indépendance du temps et de l'espace, soit la constance de la vitesse de la lumière.

Citons un exemple simple pour fixer les idées. Supposons qu'un signal horaire radiotélégraphique soit émis par la tour Eiffel, conformément à la réglementation qui vient d'être projetée pour l'unification du temps. Toutes les stations qui se trouvent à égale distance du centre d'émission recevront en même temps le signal et pourront régler leurs horloges en

conséquence, mais cette manière de régler les horloges n'est plus légitime par principe, dès lors que se basant sur la relativité de tous les mouvements on transporte les observateurs de la terre sur le soleil, c'est-à-dire si l'on considère la terre comme étant en mouvement. En effet, en vertu du principe de la constance de la vitesse de la lumière il est clair que les stations qui sont situées par rapport à la station émettrice dans le sens du mouvement de la terre recevront le signal plus tôt que celles qui sont situées à l'opposé : les premières fuient devant les ondes lumineuses qui cherchent à les atteindre tandis que les secondes marchent au-devant d'elles. Le principe de la constance de la vitesse de la lumière rend donc impossible une mesure absolue du temps, c'est-à-dire une détermination indépendante de l'état de mouvement de l'observateur : ce sont là deux choses inconciliables. Dans le conflit actuel, c'est la constance de la vitesse de la lumière a pris nettement le dessus et bien qu'il y ait eu quelques doutes récemment à ce sujet, il est probable que le principe ne subira plus aucune modification.

Le troisième postulat cité par nous plus haut a trait à la continuité de toutes les actions dynamiques. Ce postulat était autrefois une des bases incontestables de toute théorie physique. Par une interprétation assez libre des idées d'Aristote, il a été résumé dans l'adage : « natura non facit saltus ». Or les progrès de la science moderne ont ouvert une brèche dangereuse dans ce bastion, jusqu'ici inviolé de l'ancienne physique. Cette fois-ci ce sont les principes de la thermodynamique qui sont entrés en conflit avec l'antique

postulat, à la suite de nouvelles découvertes expérimentales. Selon toutes les apparences les fours de son règne sont déjà comptés. La nature semble en effet effectuer des bonds et cela de façon bien singulière. Pour me permettre de mieux élucider ce point, permettez-moi une comparaison.

Imaginons une vaste étendue d’eau à la surface de laquelle un vent violent soulève une forte houle. Si le vent vient à cesser les vagues n’en continueront pas moins à déferler d’une rive à l’autre pendant encore assez longtemps, mais le phénomène se modifiera d’une manière caractéristique avec le temps. L’énergie contenue dans les grandes ondes du début se répartira peu à peu entre des ondes de plus en plus courtes et de plus en plus faibles, surtout par suite du choc de l’eau contre les rives et contre d’autres corps solides. Cet émiettement de l’énergie avec le temps ira en s’accentuant jusqu’à ce que les ondes deviennent si petites qu’elles échappent à toute observation. En définitive, nous aurons la transformation d’un mouvement sensible en chaleur, d’un mouvement macroscopique en un mouvement moléculaire, d’un mouvement ordonné en un mouvement désordonné. Dans un mouvement ordonné, les molécules ont en effet la même direction et la même vitesse ; dans un mouvement désordonné, au contraire, chaque molécule à une vitesse dont l’intensité et la direction sont indépendantes des vitesses et des autres molécules.

Mais le processus d’émiettement de l’énergie, tel que nous venons de le décrire, est nécessairement limité par la grandeur des atomes, car le mouvement d’un atome isolé considéré à

part, est toujours un mouvement ordonné, toutes les parties d’un atome se mouvant avec la même vitesse ; c’est pourquoi plus les atomes seront grands et moins l’énergie totale du mouvement sera susceptible de se disperser. Jusqu’ici tout est parfaitement clair et s’accorde complétement tant avec la théorie classique qu’avec l’expérience.

Considérons maintenant un phénomène tout à fait analogue ayant pour siège, non plus des ondes aqueuses, mais des ondes lumineuses ou celles de la chaleur rayonnante. Nous supposerons alors que les rayons provenant d’un corps fortement incandescent sont rassemblés à l’intérieur d’une enceinte entièrement close par un système de réflecteurs appropriés et qu’ils rebondissent sans arrêt sur les parois réfléchissantes de cette enceinte. Dans ce cas également, il y aura transformation des grandes longueurs d’onde en longueur d’onde plus courtes et du rayonnement ; ordonné en un rayonnement désordonné. Mais les rayons infra-rouges correspondent aux grandes ondes plus grossières et les ondes courtes aux radiations ultra-violettes du spectre ; on doit, d’après la théorie classique, s’attendre à ce que le rayonnement tout entier se transforme finalement en radiation ultra-violette. En d’autres termes, les rayons infra-rouges et les rayons visibles devraient disparaître et se transformer principalement en rayons ultraviolets invisibles, manifestables par leur seule activité chimique.

Mais l’expérience montre qu’il n’y a pas trace d’un tel phénomène. La transformation atteint bientôt un état limite bien défini et cet état reste stable sous tous les rapports.

Les tentatives les plus diverses ont été faites pour essayer de concilier cet état de choses avec la théorie classique, mais jusqu’ici, il est toujours apparu que la raison de la contradiction était beaucoup trop profonde pour que l’on puisse la faire disparaître sans toucher aux fondements de la théorie. Une révision s’imposait donc mais, cette fois-ci encore, ce sont les principes fondamentaux de la thermodynamique qui sont demeurés inébranlables.

L’unique moyen, trouvé jusqu’ici, moyen qui permet d’espérer une solution complète de l’énigme, consiste à s’appuyer sur les deux postulats fondamentaux de la thermodynamique en les combinant avec une nouvelle hypothèse bien mystérieuse. Pour donner une idée suffisamment nette de cette hypothèse nous continuerons notre comparaison de tout à l’heure. Dans le cas des ondes aqueuses, l’émiettement de l’énergie a un terme du fait que les atomes possèdent jusqu’à un certain point une énergie indivisible (un atome représente un certain quantum de matière qui ne peut se mouvoir que comme un tout). Le cas de la chaleur rayonnante et de la lumière est analogue bien qu’il ne s’agisse plus que de mouvements entièrement immatériels. Il y aura donc, là aussi, des causes qui arrêteront l’émiettement de l’énergie et celui-ci ne pourra pas aller au delà d’un certain quantum de valeur finie. Ces causes freineront d’autant plus

l’émiettement que les ondes seront plus courtes, c’est-à-dire les vibrations plus rapides.

Comment de tels quanta de nature purement dynamique peuvent-ils parvenir à s’établir ? On ne peut encore rien dire de certain à ce sujet. En tout cas l’hypothèse des quanta conduit à admettre qu’il y a dans la nature des phénomènes n’ayant pas lieu d’une manière continue, mais brusquement et, pour ainsi dire, explosivement. J’ai à peine besoin de dire que cette hypothèse s’est trouvée par la suite fortement corroborée quand furent découverts et étudiés en détail les phénomènes de radioactivité. Du reste, les difficultés soulevées par l’examen approfondi et par la mise en œuvre de l’hypothèse des quanta perdent visiblement de leur importance, quand elles sont mises en parallèle avec le fait que cette hypothèse a permis de prévoir des résultats concordant mieux avec les mesures du rayonnement que les résultats déduits de toutes les autres théories.

Mais il y a plus. S’il est un préjugé favorable à une hypothèse nouvelle, c’est bien le fait de la voir trouver confirmation dans des domaines auxquels on ne pensait pas au moment où elle fut élaborée : or tel est précisément le cas de l’hypothèse des quanta. À ce propos, je me permettrai de citer un exemple particulièrement frappant : Depuis qu’on a réussi à liquéfier l’air, l’hydrogène et l’hélium, un nouveau et vaste domaine s’est ouvert aux chercheurs, celui des basses températures, et ce domaine a été particulièrement fertile en découvertes souvent très étonnantes. Pour échauffer un morceau de cuivre

de −250° à −249° on ne doit pas fournir la même quantité de chaleur que pour échauffer ce même morceau de 0° à +1° mais bien une quantité environ 30 fois moindre. Si la température était encore plus basse la quantité de chaleur serait encore plus petite jusqu'à décroître au delà de toute limite. Ce fait heurte, non seulement toutes les idées courantes, mais encore il s'oppose diamétralement aux exigences de la théorie classique. En effet, si depuis plus de 100 ans on sait distinguer la quantité de chaleur de la température, il n'en est pas moins vrai que la théorie cinétique de la matière permet de conclure à une certaine relation entre ces deux grandeurs qui devraient être, sinon tout à fait proportionnelles, du moins variables parallèlement.

La théorie des quanta a parfaitement réussi à résoudre cette difficulté et de plus elle a conduit à un autre résultat important, c'est que les forces qui produisent les oscillations thermiques dans un corps solide sont absolument de la même espèce que les forces qui provoquent les vibrations élastiques. Actuellement il est possible, grâce à l'hypothèse des quanta, de calculer l'énergie calorifique d'un corps monoatomique aux diverses températures à partir des propriétés élastiques de ce corps, chose tout à fait impossible en s'appuyant sur la théorie classique. On peut rattacher à ces considérations un certain nombre de questions assez étranges à première vue. Par exemple celle-ci : La vibration d'un diapason sonore, au lieu d'être continue, ne serait-elle pas fractionnée en quanta ? Dans le cas des vibrations acoustiques, en raison de leur faible fréquence, il ne peut certes être question que de quanta

énergétiques d’une petitesse extrême. (Pour le *la* normal, par exemple, leur valeur ne serait environ que les 3 quatrillionièmes de l’unité mécanique C. G. S.). La théorie ordinaire de l’élasticité n’aurait donc aucunement besoin d’être modifiée, d’autant plus qu’elle traite déjà la matière comme si elle était une quantité parfaitement continue alors que pour être rigoureusement exacte il faudrait la considérer comme étant formée d’atomes, c’est-à-dire comme possédant elle-même une structure quantique. Néanmoins, au point de vue des principes théoriques, les changements entraînés par l’introduction de l’hypothèse n’en restent pas moins évidemment d’une importance énorme. Bien que la nature intime de ces quanta dynamiques reste encore assez énigmatique, en raison des faits actuellement connus, il devient difficile de douter qu’ils existent en quelque manière ; car ce qui peut être mesuré doit forcément exister.

Ainsi donc les recherches de la physique moderne tendent à mettre de plus en plus en évidence la cohérence intime des différentes parties de la représentation de l’univers physique et à dévoiler toujours davantage certains traits caractéristiques assez spéciaux de sa structure. Ces traits étaient demeurés cachés jusqu’ici en raison de la finesse insuffisante des moyens d’investigation dont on disposait. Cependant il n’en est pas moins vrai qu’on peut toujours se demander ce que vaut un tel progrès au point de vue de la satisfaction de notre besoin de savoir. Est-ce que nous nous sommes rapprochés d’un seul pas de la nature ? La question est assez importante pour que nous nous y arrêtions un instant.

Nous ne dirons certes rien de bien nouveau, tout ayant été mille fois dit et redit à ce sujet, Mais, comme les opinions les plus opposées s'affrontent aujourd'hui brutalement sur ce point, il est indispensable à tout homme qui s'intéresse vraiment au but de la science de prendre position sur cette question.

Il y a 35 ans, Hermann Helmholtz disait que nos perceptions ne nous donnent qu'une transposition symbolique et jamais une représentation fidèle du monde extérieur. Nous ne possédons, en effet, aucun moyen permettant de démontrer l'existence d'une similitude entre les caractéristiques d'un phénomène extérieur et les caractéristiques de la sensation que ce phénomène éveille en nous. Toutes idées que nous avons sur le monde extérieur ne reflètent, en dernière analyse, que vos propres sensations. Dans ces conditions, il est permis de se demander s'il y a un sens à parler d'un moi conscient par opposition à une « nature en soi » indépendante de lui. Est-ce que ce que l'on appelle « lois naturelles » ne serait pas, au fond, un ensemble de règles plus ou moins parfaites ayant pour but de résumer aussi exactement que possible la succession temporelle de nos sensations ? Si l'on admet que telle soit la vérité, il faut en conclure que, non seulement le sens commun de l'humanité, mais encore les conceptions des savants eux-mêmes auraient fait fausse route. L'histoire tout entière du développement de la connaissance en physique nous montre que celui-ci a toujours lieu dans le sens d'une séparation, en principe, aussi complète que possible, entre les phénomènes du monde extérieur et les phénomènes sensoriels qui ont lieu dans l'être humain.

Il y a fort heureusement un moyen d'échapper très vite à cette difficulté captieuse, c'est de continuer jusqu'au bout dans la voie où nous avons commencé. Nous admettrons donc pour le moment que nous soyons en possession : d'une représentation de l'univers tout à fait satisfaisante, grâce à laquelle, par conséquent, il est possible de rendre parfaitement compte de toutes les lois naturelles découvertes empiriquement. On ne peut pas, c'est entendu, prouver que cette représentation soit conforme, même tant soit peu, à la « nature réelle ». Mais cette proposition à une contre-partie à laquelle on ne pense malheureusement pas assez : c'est qu'il n'est pas davantage possible de prouver que notre représentation ne reproduit pas d'une manière absolument fidèle les traits de la « nature réelle ». Pour pouvoir réfuter cette nouvelle proposition, il faudrait en effet connaître avec certitude quelque chose de cette « nature réelle » ; or, par hypothèse cela est absolument exclu.

On le voit donc, nous sommes au bord d'un abime dans lequel aucune science n'est capable de pénétrer. Ce n'est pas à la raison pure qu'il appartient de le combler, mais à la raison pratique : à l'idée que tout esprit sain se fait du monde.

Une conception scientifique de l'univers peut manquer autant qu'on le voudra de preuves scientifiques, on ne pourra pas moins en développer les conséquences et s'attendre à la voir tenir tête à tous les assauts, si elle ne contient pas de contradiction interne et si elle est en accord avec les faits expérimentaux. D'autre part, il ne faudrait pas s'imaginer que, même dans la plus exacte de toutes les sciences, on puisse faire

des progrès, en se passant d'une conception générale de l'univers, c'est-à-dire, en définitive d'hypothèses indémontrables. Même en physique, s'applique l'adage qu'il n'y a pas de bonheur sans la foi ou tout au moins sans la foi à une certaine réalité qui nous soit extérieure. Cette foi inébranlable c'est elle qui dirige les impulsions toujours progressantes de notre effort créateur, c'est elle qui fournit l'appui indispensable à une fantaisie toujours prête à s'égarer, c'est elle qui réconforte nos esprits abattus par l'insuccès et qui leur infuse un courage nouveau pour reprendre la conquête de l'inconnu. Tout chercheur qui ne se laisse pas guider par une hypothèse, à laquelle il pourra d'ailleurs attribuer un caractère aussi provisoire qu'il lui plaira, renonce, par là même, à comprendre vraiment à fond les résultats qu'il pourra trouver. On ne peut certes convaincre ni d'illogisme, ni d'infidélité à l'expérience celui qui ne veut pas croire à la réalité des atomes et des électrons ou encore à la réalité de l'identité de la chaleur et du mouvement moléculaire. Mais ce qu'on ne voit pas, c'est comment un tel savant peut faire progresser la connaissance en physique, en maintenant son point de vue.

Certes, la foi ne suffit pas, elle peut mener à l'erreur, aux idées étroites et au fanatisme, toute l'histoire des sciences est là pour le prouver. Pour qu'elle demeure un guide sûr, il faut qu'elle marche la main dans la main avec les lois de la pensée et celles de l'expérience. La réalisation de cet accord est, en dernière analyse, le fruit du labeur individuel du savant, de cet effort pénible exigeant l'abnégation et qui vient à bout de tout. Personne, fût-il un roi de la science, n'est dispensé de fournir, à

l’occasion, une certaine somme de ce travail de tâcheron, que ce soit dans un laboratoire, au milieu des archives, ou dans un cabinet de travail. Dans ces luttes pénibles, le savant se fortifie intellectuellement et il acquiert, de l’univers, une conception plus mûre. Pour être à même d’apprécier à sa juste valeur ce que l’on acquiert alors, il faut en avoir l’expérience personnelle.

CHAPITRE III

LOIS STATISTIQUES ET LOIS DYNAMIQUES

Toutes les sciences, surtout celles qui sont en pleine jeunesse, sont fertiles en découvertes imprévues et même imprévisibles ; toutes, sans en excepter même les mathématiques, sont, jusqu'à un certain point, des sciences expérimentales. Qu'une science ait pour objet la nature ou bien la civilisation intellectuelle, son rôle principal sera toujours de mettre de l'ordre et de la cohérence dans la masse des faits et des expériences accumulés, de combler les lacunes qui s'y trouvent et d'unifier enfin le tout dans une synthèse.

Cette unification ne serait d'ailleurs pas possible si les lois qui s'appliquent aux objets si divers des différentes sciences différaient autant par leur nature qu'on serait tenté de le croire quand on compare, par exemple, une question d'histoire et une question de physique. En tout cas, il serait complètement faux de vouloir trouver une différence de principe, entre les lois qui régissent les deux domaines, dans le fait que les lois qui se trouvent dans les sciences de la nature sont absolues et ne comportent pas d'exceptions et que, par suite, le cours des phénomènes régis par ces lois a un caractère de nécessité ; tandis que dans le domaine des sciences morales,

l’enchaînement causal est toujours interrompu, çà et là, par l’irruption d’une certaine dose de hasard et d’arbitraire. D’une part, en effet, toute activité intellectuelle, scientifique, même si cette activité a pour objet ce qu’il y a de plus élevé dans l’esprit humain, repose sur un postulat indispensable, à savoir qu’il existe, au-delà et au-dessus de tout hasard, de tout arbitraire, un ordre régi par des lois. D’autre part, aussi, il arrive très souvent, même en physique, la plus exacte pourtant de toutes les sciences de la nature, qu’on étudie des phénomènes dont les lois nous sont encore très obscures. Si l’on donne au mot hasard un sens correct, il n’y a donc aucun inconvénient à tenir ces phénomènes pour fortuits.

Considérons maintenant, comme application à un cas spécial, ce qui se passe dans les substances radioactives, dont les atomes sont en voie de destruction continuelle selon l’hypothèse, aujourd’hui universellement admise, de Ramsay et Soddy. Voici un atome d’uranium qui est resté absolument passif et invariable au milieu des atomes de la même espèce qui l’entourent pendant d’innombrables millions d’années ; tout à coup, sans aucune cause extérieure, dans un intervalle de temps dont la brièveté défie toute mesure, cet atome explose avec une violence auprès de laquelle le brisance de nos explosifs les plus formidables n’est qu’un jeu d’enfant. Les débris en sont projetés dans l’espace avec des vitesses atteignant des milliers de kilomètres à la seconde et le phénomène s’accompagne de l’émission d’un rayonnement électromagnétique dont la finesse dépasse celle des rayons de Röntgen les plus pénétrants. À côté de lui l’atome voisin, qui

lui est identique en tout point, assiste indifférent au cataclysme ; peut-être même devra-t-il attendre des millions d'années avant de subir le même sort. Ajoutez à cela que tous les essais entrepris dans le but d'influencer le phénomène, tels que l'élévation ou l'abaissement de la température, ont complètement échoué, ainsi donc il n'y a pas le moindre espoir de parvenir à se faire une idée des lois qui régissent les phénomènes de la désintégration de l'atome. Et cependant l'hypothèse de cette désintégration est une des hypothèses les plus importantes de la physique, elle groupe en un clin d'œil une masse considérable de faits, jusqu'alors incohérents et inexpliqués ; elle conduit à des prévisions très nombreuses dont les unes ont déjà été brillamment vérifiées par l'expérience et dont les autres ont donné lieu à des travaux et à des découvertes importantes. Comment donc tout cela est-il possible ? Comment peut-on établir de véritables lois pour ces phénomènes dont le cours est, semble-t-il pour le moment, sous tous les rapports, livré au hasard le plus aveugle ? Le moyen en a été fourni par une science qui depuis longtemps déjà a trouvé des applications dans les sciences sociales. Cette science, n'est autre que la méthode statistique. La physique, elle aussi, a su l'apprécier et elle l'a utilisée avec un succès toujours grandissant depuis la seconde moitié du siècle dernier. La méthode en question relève de considérations tout à fait différentes de l'idée de causalité pure et son développement conditionne de la façon la plus étroite l'évolution de la physique moderne. Au lieu de s'évertuer à découvrir les lois dynamiques obscures régissant le détail compliqué des

phénomènes, on se contente, pour un phénomène donné, de rassembler le résultat d'observations éparses répétées un grand nombre de fois. Ceci fait, pour chaque catégorie de résultats, on calcule la moyenne des valeurs trouvées. Or on peut découvrir pour ces moyennes des règles expérimentales, variables selon les circonstances, qui permettent de prévoir le cours futur des phénomènes. Cette prédiction n'est jamais, il est vrai, absolument certaine ; mais elle a une probabilité qui équivaut très souvent, en pratique, à la certitude et elle porte, non plus, sur le détail complexe des phénomènes qui n'a, le plus souvent, aucune importance, mais sur le comportement moyen de l'ensemble.

Cette méthode, avec son caractère, en somme provisoire, peut ne pas satisfaire notre besoin d'exactitude scientifique ; car ce besoin ne peut être apaisé que par la découverte du lien causal. On peut aussi la juger peu satisfaisante et n'éprouver aucune sympathie pour elle, mais il n'en reste pas moins vrai qu'elle est devenue pratiquement indispensable en physique, on ne pourrait y renoncer sans anéantir les conquêtes les plus récentes de cette science. D'ailleurs, il ne faut pas l'oublier, on n'a jamais affaire en physique à des grandeurs absolument déterminées ; car tout nombre exprimant le résultat d'une mesure est affecté d'une erreur possible. Vouloir ne tenir compte que de nombres précis sans admettre une certaine latitude d'erreur reviendrait donc à renoncer à l'utilisation rationnelle des résultats de la méthode inductive.

De l’état de choses qui vient d’être décrit, il résulte avec une évidence suffisante que, si l’on veut comprendre vraiment le caractère essentiel de toute connaissance en physique, on ne saurait accorder trop d’importance à la distinction existant entre ces deux espèces de lois : les lois statiques et les lois dynamiques. On me permettra donc d’insister en donnant quelques exemples.

Commençons par un exemple banal. Prenons deux tubes de verre reliés entre eux par un tuyau de caoutchouc et versons un liquide pesant, du mercure par exemple, par l’extrémité supérieure d’un des deux tubes ; nous verrons alors le liquide remonter par l’autre tube en passant par le tuyau de caoutchouc et l’ascension se poursuivra jusqu’à ce que les niveaux soient les mêmes dans les deux tubes. En outre l’état d’équilibre se rétablira de lui-même s’il vient à être dérangé d’une façon quelconque. Si nous élevons brusquement l’un des tubes de telle sorte que le mercure soit soulevé un instant et que par suite son niveau devient supérieur à ce qu’il est dans l’autre, le mercure redescendra aussitôt jusqu’à ce que l’égalité des niveaux soit rétablie, telle est la loi élémentaire bien connue des vases communicants dont le siphon n’est qu’une application.

Passons maintenant à un autre phénomène. Prenons un morceau de fer, portons-le à une température élevée en le mettant dans un four et jetons-le ensuite dans un récipient rempli d’eau froide, la chaleur du fer se répandra dans l’eau et l’échauffement de l’eau durera jusqu’à ce que l’égalité de

température soit établie. On arrive alors à ce qu'on appelle l'équilibre thermique, cet équilibre se rétablit lorsqu'on le perturbe.

Il y a donc une analogie évidente entre les deux phénomènes que nous venons de décrire. Pour tous les deux, la condition nécessaire de modification est l'existence d'une certaine différence. Cette différence sera, dans le premier cas, une différence de niveau, dans le second une différence de température. L'équilibre a lieu quand la différence s'annule. C'est pourquoi on dit quelquefois que la température est le niveau thermique et que, dans le premier cas, l'énergie de gravitation, dans le second, l'énergie thermique tombe d'un niveau supérieur à un niveau inférieur, la chute se poursuivant dans les deux cas jusqu'à l'égalité des niveaux.

Aussi verrons-nous sans étonnement une énergétique portée aux généralisations trop hâtives s'emparer de cette analogie et voir dans les deux phénomènes l'application d'un même grand principe baptisé par elle « principe du devenir ». D'après ce principe tout changement ayant lieu dans la nature pourrait se ramener à un échange d'énergie et, à ce point de vue, toutes les formes d'énergie seraient considérées comme autonomes et comme pleinement équivalentes. À toute forme d'énergie correspondrait un facteur d'intensité qui lui est propre : pour la gravitation, ce facteur serait la hauteur, pour la chaleur, la température. C'est la différence dans les facteurs d'intensité qui déterminerait la manière dont les phénomènes se déroulent dans le temps. Comme le principe semblait évident, personne

ne songeait à mettre en doute qu'il ne fût valide dans tous les cas absolument ; et comme il était inévitable, il devint objet de vulgarisation et passa même dans les livres d'enseignement élémentaire.

Cependant l'analogie entre le cas de la gravitation et le cas de la chaleur est en réalité tout à fait superficielle. Un abîme profond sépare les lois auxquelles ces deux phénomènes sont soumis. De l'ensemble des faits expérimentaux accumulés à ce sujet, il résulte, en effet, avec certitude que le premier phénomène obéit à une loi dynamique et le second à une loi statistique. En d'autres termes, si le liquide coule d'un niveau supérieur vers un niveau inférieur, c'est là une nécessité, tandis que si la chaleur passe d'une température élevée à une autre plus basse, ce n'est qu'une probabilité.

Naturellement une affirmation aussi étrange, disons même aussi paradoxale, doit être appuyée par un faisceau de preuves absolument convaincant. Je m'efforcerai donc de produire la plus importante d'entre ces preuves et, ce faisant, j'aurai du même coup rempli la tâche que je me propose, qui est de montrer le contraste existant entre les lois statiques et les lois dynamiques.

En ce qui concerne la nécessité de la chute du liquide pesant on peut montrer facilement qu'elle est une conséquence du principe de la conservation de l'énergie, car si la surface du liquide placée au niveau le plus élevé s'élevait encore davantage sans l'aide d'aucune impulsion extérieure entraînant un abaissement correspondant, il y aurait création d'énergie, ce

qui est contraire au premier principe de la thermodynamique. Dans le cas de l'autre phénomène, il n'en est déjà plus ainsi, car le transport de chaleur pourrait aussi bien se faire de telle sorte que la chaleur passât de l'eau froide dans le fer chaud sans que le principe de la conservation de l'énergie fût violé. Tout ce que ce principe demande, c'est que la chaleur fournie par l'eau soit égale à la chaleur cédée au fer.

Mais il y a encore une autre différence entre les cours des deux phénomènes qui ne saurait échapper, même à l'observateur le moins averti. Le liquide qui tombe d'un niveau élevé vers un autre plus bas coulera d'autant plus vite qu'il s'abaissera davantage et quand l'égalité des niveaux dont nous avons parlé plus haut s'est établie, le liquide ne restera pas au repos dans la position d'équilibre, il la dépassera au contraire en vertu de son inertie, de telle sorte que le liquide qui était tout à l'heure au niveau le plus élevé sera maintenant au niveau le plus bas. Dans cette seconde phase du phénomène, la vitesse du liquide ira en diminuant jusqu'à devenir nulle, puis le phénomène se renouvellera dans l'ordre inverse. Si toute perte d'énergie provenant, soit de la résistance de l'air, soit du frottement du liquide contre les parois, pouvait être évitée, le liquide oscillerait indéfiniment autour de sa position d'équilibre. C'est pourquoi le phénomène peut être dit réversible.

Il en est tout autrement dans le cas de la chaleur, plus la différence de température entre le fer et l'eau sera petite et plus le transport de chaleur sera lent. Si l'on calculait au bout de combien de temps l'équilibre sera établi, on trouverait qu'il

faut un temps infini pour y parvenir. En d’autres termes, entre le fer et l’eau on trouvera toujours une petite différence de température, aussi longtemps qu’on attende. Il n’y a donc pas trace d’un mouvement oscillatoire de la chaleur entre les deux corps, le transport a toujours lieu dans le même sens, et l’on doit dire que le phénomène est irréversible.

Parmi les contrastes que l’on peut observer entre les phénomènes physiques, il n’en est pas de plus grand que celui qui oppose les phénomènes irréversibles aux phénomènes réversibles. Les phénomènes de gravitation, les oscillations électriques et mécaniques appartiennent à la première catégorie, on peut facilement les faire rentrer dans le domaine d’application d’une seule et même loi dynamique : le principe de la moindre action qui contient lui-même implicitement le principe de la conservation de l’énergie. La conductibilité thermique, la conductibilité électrique, le frottement, la diffusion et toutes les réactions chimiques pour peu qu’elles aient lieu avec une vitesse notable font partie des phénomènes irréversibles. Tous ces phénomènes obéissent, ainsi que Clausius l’a montré, au second principe de la thermodynamique ; postulat qui doit son importance et sa remarquable fécondité à ce qu’il permet de prévoir le sens dans lequel un phénomène irréversible aura lieu.

Il était réservé à Ludwig Boltzmann de découvrir, par le moyen de considérations atomistiques, la cause profonde de toutes les particularités communes à tous les phénomènes irréversibles, particularités qui sont la raison des difficultés insurmontables

que rencontre une explication dynamique de ces phénomènes. Et Boltzmann découvrait aussi du même coup quelle est la véritable signification du second principe de la thermodynamique. D'après l'hypothèse atomistique, l'énergie thermique d'un corps n'est pas autre chose que l'ensemble des mouvements irréguliers et extrêmement rapides dont les molécules de ce corps sont animées. La valeur de la température correspond à la force vive moyenne des molécules et le transport de chaleur d'un corps chaud vers un corps plus froid est dû à ce que les forces vives des molécules tendent à s'égaliser en moyenne, de part et d'autre de la surface de contact des deux corps par suite de nombreux chocs.

Il ne faudrait pas cependant supposer que dans le choc de deux molécules, celle qui a la plus grande force vive en perd nécessairement une partie tandis que celle qui a la plus petite force vive voit son mouvement s'accélérer. En effet, si une molécule animée d'un mouvement rapide reçoit de côté et suivant une direction oblique le choc d'une molécule lente, sa vitesse s'accroîtra encore davantage, tandis que la vitesse de la molécule lente diminuera. Mais, si l'on ne considère que l'ensemble des phénomènes, d'après les lois du calcul des probabilités et, en dehors de certains cas exceptionnels, il y a cependant une certaine homogénéisation des forces vives qui correspond à une uniformisation des températures. En tout cas, toutes les déductions faites dans le but de tirer les conséquences de cette hypothèse, — et dans le cas des gaz, elles ont été poussées assez loin, — ont donné des résultats compatibles avec l'expérience.

Pourtant, jusqu'à une époque récente, les considérations atomistiques qui nous paraissent aujourd'hui si séduisantes et si prometteuses, ne furent jamais, au fond, regardées que comme des hypothèses ingénieuses. Aux yeux des savants circonspects, c'était une chose par trop téméraire que de franchir d'un seul bond la frontière séparant le visible et le contrôlable de l'invisible et du mystérieux ou, en d'autres termes, d'abandonner le macrocosme pour le microcosme. Boltzmann, lui-même, évitait ostensiblement de compromettre par trop de hardiesse la portée de ses théories et de ses calculs, il insistait sur le caractère purement hypothétique de son atomisme et il disait qu'il ne fallait pas y voir une image de la réalité. Aujourd'hui nous pouvons nous permettre d'aller plus loin, pour autant du moins qu'il y a un sens, au point de vue de la théorie de la connaissance, à parler d'une image de la réalité. Nous connaissons, en effet, toute une série de faits expérimentaux qui confèrent à l'hypothèse atomistique un degré de crédibilité absolument égal à celui qui est propre aux théories de l'acoustique et de l'électromagnétique, aux théories de la lumière et de la chaleur rayonnante.

D'après le principe énergétiste du devenir qualifié par nous d'erroné, l'état d'un liquide en repos et où régnerait une température uniforme, devrait être absolument incompatible avec un changement quelconque ; car là où on ne saurait trouver de différences d'intensité, il ne peut y avoir non plus aucune cause de changement. Mais on peut rendre visible ce qui se passe à l'intérieur d'un liquide tel que de l'eau, par exemple, en y suspendant des particules très nombreuses et très

petites ou des gouttelettes d’un autre liquide tel que du mastic ou de la gomme gutte. Or le spectacle qui attend celui qui regarde une préparation de ce genre sous le microscope est de ceux qui ne se peuvent oublier. Il semble que l’on pénètre dans un monde entièrement nouveau. Au lieu de l’immobilité sépulcrale qu’il était naturel d’imaginer, l’observateur assiste à la plus échevelée des sarabandes de la part des particules suspendues et, chose remarquable, les particules qui se démènent le plus follement sont justement les plus petites. Il est impossible de déceler de la part du liquide aucun frottement qui freinerait le mouvement. Si, par hasard une particule vient à s’arrêter, une autre entre aussitôt à sa place dans la danse. Devant un tel spectacle, il est impossible de ne pas songer à l’activité fiévreuse d’une fourmilière que l’on aurait bouleversée avec un bâton. Mais tandis que les insectes finissent par se remettre peu à peu de leur excitation et même par perdre toute activité quand la nuit tombe, les particules ne montrent pas la moindre trace de fatigue tant que la température du liquide reste constante. Nous sommes donc en présence d’un « perpetuum mobile » au sens le plus strict du mot et non pas dans une des nombreuses acceptions figurées qui ont été données à ce terme.

L’explication de ce phénomène, découvert par le botaniste anglais Brown, a été donnée il y a déjà 25 ans par le Français Gouy. D’après ce physicien, le mouvement brownien est causé par l’agitation thermique des molécules du liquide. Ces molécules invisibles, par leurs chocs incessants contre les particules visibles qui flottent disséminées parmi elles,

provoquent les mouvements irréguliers observés. Mais la preuve décisive de l'exactitude de cette opinion n'a été apportée que tout récemment.

Smoluchowski est en effet parvenu à formuler une théorie statistique du mouvement brownien dont on peut déduire les lois régissant la densité de répartition des particules, leurs vitesses, la valeur de leur parcours et même la valeur de leurs rotations. Ces lois ont été brillamment vérifiées par l'expérience, grâce surtout aux travaux de Jean Perrin.

Pour tout physicien qui croit à la valeur de la méthode inductive, il n'y a donc aucun doute : la matière possède une structure atomique. La chaleur est identique aux mouvements des molécules et la conductibilité thermique, comme tous les autres phénomènes irréversibles obéit à des lois statistiques, c'est-à-dire à des lois de probabilité et non à des lois dynamiques. À vrai dire, il est extrêmement difficile de se faire une idée, même approximative, de l'incroyable petitesse de la probabilité qu'il y a à ce que, même pour un court instant, la chaleur suive la direction inverse de celle qui lui est habituelle, en passant, par exemple, de l'eau froide dans le fer chaud. Supposons que l'on extraie au hasard des lettres d'un sac qui en contient une grande quantité et qu'on les place côte à côte dans l'ordre où on les a tirées, on conçoit qu'il est possible d'obtenir par ce moyen un texte pourvu d'un sens, peut-être même une poésie de Gœthe. Au jeu de dés, il est également possible d'amener cent fois de suite le six, car le résultat de chaque coup est indépendant de celui du coup précédent. Et

pourtant, cela n'empêche pas que si quelque chose de semblable venait à se produire réellement, personne n'hésiterait à affirmer que le jeu n'est pas loyal ou bien que les dés ne possèdent sans doute pas une symétrie parfaite et personne ne serait assez déraisonnable pour s'inscrire en faux contre une telle manière de voir. La probabilité pour que le phénomène en question ait eu lieu dans des conditions normales est, en effet, par trop faible. Or cette probabilité est tout à fait énorme par rapport à la probabilité qu'il y a pour que la chaleur passe, même une seule fois, d'un corps froid dans un corps chaud. Dans le cas du dé, il ne peut y avoir que 6 cas possibles correspondant à 6 nombres différents inscrits sur ses faces.

Dans le cas des lettres, il s'agit de 25 possibilités différentes ; mais dans le cas des molécules c'est un grand nombre de millions qui peuvent se trouver dans le plus petit espace visible, et de plus ces molécules sont animées des vitesses les plus diverses.

Au point de vue pratique la possibilité d'exceptions aux lois de conductibilité thermique ne saurait donc entraîner aucun inconvénient.

Au point de vue théorique, il en est tout autrement. Aux yeux de tout le monde il est en effet évident qu'une probabilité, fût-elle aussi petite qu'on le voudra, est séparée d'une impossibilité par un abîme infranchissable. D'ailleurs il y a des cas où l'existence de cet abîme est tout à fait manifeste, il suffit de jouer aux dés pendant suffisamment longtemps pour pouvoir escompter amener 100 fois de suite 6, et cela avec une

probabilité qui peut être très grande. De même, si l’on a la patience de tirer des lettres assez longtemps, on finira certainement par arriver à composer le monologue de Faust. Fort heureusement, nous n’en sommes pas réduits à cette seule méthode de vérification, car pour pouvoir compter sur une réussite la durée d’une vie humaine et, peut-être, celle du genre humain tout entier ne suffirait pas.

Bien plus, il y a des cas où, même en physique, il convient de prendre en sérieuse considération des probabilités extrêmement minimes. Une poudrière peut exploser un beau jour sans qu’aucune cause externe puisse être attribuée à l’accident. À une inflammation de cette sorte, dite spontanée, comment pourrait-on attribuer une autre cause que la suivante : une accumulation de chocs, de soi extrêmement improbables, entre des molécules susceptibles de réagir chimiquement les unes sur les autres dans le sens fatal. Or cette accumulation est, on le voit aisément, régie par des lois purement statistiques. Par exemple, on saisit combien il faut être prudent dans l’emploi des mots tels que « sûr » où « certain », même dans une science exacte. On peut aussi apprécier par là combien modeste est parfois la portée des lois expérimentales.

Ainsi donc, pour des raisons tirées, tant de la théorie que de la pratique, il est indispensable d’établir une distinction fondamentale entre les lois nécessaires et celles qui sont simplement probables. Toutes les fois que l’on sera en présence d’une loi, la première chose à se demander sera donc : cette loi est-elle une loi statistique ou une loi dynamique ? Il y a là un

dualisme, et même un dualisme inévitable, dès lors que les considérations statistiques ont droit de cité en physique, néanmoins bien des gens n'en ont pas été pleinement satisfaits et ont cherché à le faire disparaître. Dans ce but, ils se sont résignés à nier l'existence de toute certitude et de toute impossibilité absolue et à n'admettre que des probabilités plus ou moins grandes. Selon eux, il n'y aurait plus de lois dynamiques dans la nature, mais seulement des lois statistiques et le concept de nécessité absolue serait à exclure de la physique. Contre cette opinion, qui est une erreur grossière et pernicieuse, on peut objecter que tous les phénomènes réversibles, sans exception, sont régis par des lois dynamiques, il n'y a donc aucune raison de supprimer cette dernière catégorie de lois. Mais il y a bien mieux encore : la physique, pas plus que n'importe quelle autre science, que cette science soit une science de la nature ou une science de l'esprit humain, ne peut se passer de la notion de loi absolue ; sans cette notion, la statistique elle-même ne fournirait que des résultats dénués de leur fondement le plus essentiel. Il ne faut pas l'oublier, en effet, les lois elles-mêmes du calcul des probabilités, non seulement peuvent, mais encore doivent, être prouvées rigoureusement ; aussi voyons-nous de tout temps ces questions de probabilité susciter au plus haut point l'intérêt des mathématiciens les plus éminents.

Si la probabilité de voir un événement donné succéder à tel autre est égale à 1/2 cela ne signifie aucunement que l'on ne sache absolument rien du second phénomène, cela veut dire tout au contraire que parmi les cas de production du premier

phénomène, il y en a exactement 50 % qui entraînent aussi la production du second et que le pourcentage énoncé se vérifiera d'autant plus exactement que l'on examinera un plus grand nombre de cas. D'ailleurs, dans le cas où le nombre d'observations serait insuffisant, le calcul des probabilités permet de prévoir quel sera l'écart auquel il faut s'attendre entre le résultat observé et la moyenne, c'est-à-dire de calculer ce que l'on nomme la dispersion. Si les observations expérimentales se trouvent en désaccord avec la valeur calculée pour la dispersion, on peut conclure avec certitude qu'il y a une supposition inexacte au point de départ des calculs, autrement dit, qu'il y a une erreur systématique.

Pour arriver à démontrer des propositions d'un caractère aussi précis, il a fallu naturellement partir d'un certain nombre de conditions supposées remplies, par hypothèse. En physique, par exemple, la détermination exacte des probabilités n'est possible que si les phénomènes élémentaires ultimes dits microscopiques obéissent uniquement à des lois dynamiques. Bien que l'observation, en raison de la grossièreté de nos sens, ne puisse rien nous faire connaître de ces lois, le postulat de leur caractère absolument universel et nécessaire reste cependant le fondement indispensable de toute statistique.

De tout ce qui précède, il résulte que le dualisme qui oppose lois statistiques et lois dynamiques est étroitement lié à l'opposition du macrocosme et du microcosme, qui est elle-même un fait d'expérience. Il n'est point de théorie capable d'annihiler les faits. Aussi qu'on le veuille ou non, il est

impossible de ne pas attribuer, tant aux lois statistiques qu'aux lois dynamiques, la place qui leur revient légitimement dans l'ensemble des théories physiques. Cependant la dynamique et la statistique ne devront pas être conçues comme se trouvant l'une vis-à-vis de l'autre dans un simple rapport de coordination et placées de ce fait sur un pied d'égalité. Les lois dynamiques satisfont en effet complètement à notre besoin de causalité et elles ont, à cause de cela, un certain caractère de simplicité. Les lois statistiques, par contre, forment toujours un ensemble complexe qui ne se présente jamais comme quelque chose de définitif, car elles comportent toujours, à l'état latent, le problème de leur réduction à des lois dynamiques élémentaires. La solution progressive des problèmes de ce genre est une des tâches principales de la science, comme le montre l'exemple de ce qui se passe, tant en chimie que dans les théories physiques sur la matière et l'électricité.

Même en météorologie, on trouve quelque chose d'analogue. L'œuvre de Bjerknes représente, en effet, un effort considérable pour la réalisation du plan grandiose consistant à ramener toute la statistique météorologique à ses éléments fondamentaux, c'est-à-dire aux lois physiques ordinaires. Une telle tentative sera-t-elle couronnée de succès ? Il est difficile de le dire. En tout cas, l'essai ne pouvait pas ne pas être fait ; car s'il appartient toujours à ln statistique de dire le premier mot, le dernier lui échappe, non moins nécessairement.

Comme le principe de la conservation de l'énergie occupe le premier rang parmi les lois dynamiques, de même le second

principe est le plus important des lois statistiques. Ce fait ne l'empêche d'ailleurs nullement d'être susceptible d'une énonciation générale rigoureuse, bien qu'on parle souvent des limites de sa validité. Cet énoncé exact pourrait être formulé à peu près ainsi : Tous les changements physico-chimiques ont lieu, en moyenne, dans un sens tel que la probabilité des états qu'ils amènent va en croissant. Par exemple, de tous les états qu'un système de corps peut prendre, le plus probable, présente cette particularité que tous les corps y sont à la même température et c'est aussi l'unique raison pour laquelle la conduction de la chaleur a toujours lieu, en moyenne, dans le sens qui aboutit à cette uniformisation de la température.

Mais, en ce qui concerne un phénomène donné, le second principe ne permet de rien affirmer si l'on ne s'est pas assuré tout d'abord que, dans sa marche, il ne s'écarte pas notablement de la marche moyenne d'un grand nombre de phénomènes débutant par le même état initial. Théoriquement l'hypothèse du désordre élémentaire suffit pour que cette condition soit remplie, mais, expérimentalement, le seul moyen de contrôle consiste à répéter la même expérience un grand nombre de fois successivement ou à la faire reproduire par des expérimentateurs travaillant indépendamment les uns des autres. Cette reproduction d'une même expérience, souvent un grand nombre de fois, est d'un usage constant en physique pratique. Quel est en effet le physicien qui se contenterait d'exécuter une seule fois la même expérience, quand ce ne serait que pour éliminer les erreurs d'expérience inévitables ?

Si nous passons maintenant à l’énergie nous voyons qu’elle n’a aucun rapport direct avec le second principe, la meilleure preuve en est qu’il existe un phénomène qui peut n’être accompagné d’aucune variation d’énergie : ce phénomène est la diffusion. Celle-ci a lieu tout simplement parce que le mélange intime de deux substances différentes est plus probable qu’un mélange où la répartition n’est pas uniforme. On peut, il est vrai, soumettre la diffusion aux lois de l’énergétique en introduisant la notion de l’énergie libre. Cette notion permet de formuler les faits d’une façon commode et assez intuitive ; mais son emploi ne constitue jamais qu’un procédé indirect, car l’énergie libre ne peut être définie en faisant abstraction de ses rapports avec la probabilité.

Nous terminerons ce rapide aperçu en jetant un coup d’œil sur les phénomènes de la vie psychique. Ici encore, nous voyons que tout se passe de la même façon ; avec cette différence cependant, que l’importance de la causalité stricte y est très inférieure à celle de la probabilité. En d’autres termes, le microcosme s’efface devant le macrocosme. Pourtant malgré tout, le postulat d’un déterminisme absolu s’étendant même à ce qui touche la volonté humaine et la morale n’en reste pas moins, ici comme partout ailleurs, la condition indispensable de la recherche scientifique. Toutefois, dans cette application du déterminisme, on ne doit pas négliger une précaution qui s’impose dans les sciences de la nature elle-même. Cette précaution à laquelle on ne fait ordinairement pas attention, bien qu’on la tienne comme allant de soi, consiste à s’assurer que le phénomène à examiner n’est pas troublé dans son cours,

par l’action de l’expérimentateur lui-même. Si un physicien veut mesurer la température d’un corps, il ne faut pas qu’il se serve d’un thermomètre tel que la température de ce corps soit modifiée quand on le met en contact avec le thermomètre. En principe, une recherche psychologique ne peut donc être pleinement objective que si elle a pour objet une personne autre que celle de l’expérimentateur et pour autant que cette personne est effectivement indépendante de lui. En ce qui concerne l’auto-observation, elle ne pourrait être admissible qu’en ce qui concerne le passé, pour autant que ce passé se présente aux yeux du psychologue comme quelque chose d’achevé et de définitif, dépourvu d’influence sur son propre présent. En aucun cas l’expérimentation ne saurait s’étendre au présent ni à l’avenir, d’ailleurs accessible uniquement par l’intermédiaire du présent. La pensée et la recherche scientifique sont en effet des parties intégrantes de la vie psychologique humaine et si l’objet de la recherche est identique avec le sujet pensant et cherchant, ce dernier se trouvera être dans un état de transformation perpétuelle au fur et à mesure que la connaissance progressera.

Il est donc tout à fait vain, et c’est se lancer dans une entreprise sans issue, d’essayer de rendre compte d’une façon parfaitement adéquate de son propre avenir, en adoptant le point de vue déterministe et en éliminant le concept du libre arbitre moral. Le libre arbitre, tel que nous le fait connaître le témoignage de notre conscience, est un pouvoir d’autodétermination qu’aucun lien causal ne saurait limiter. Le regarder comme inconciliable avec un déterminisme absolu

régissant tous les phénomènes de la vie psychologique, c’est commettre une erreur de principe tout à fait semblable à celle du physicien qui négligerait la précaution dont nous avons parlé plus haut ; on pourrait aussi dire que c’est se tromper de la même façon qu’un physiologiste qui prétendrait étudier les fonctions naturelles d’un muscle sur une préparation anatomique de ce même muscle.

Nous le voyons donc, c’est la science qui se pose à elle-même des limites infranchissables. Mais l’effort humain ne peut pas s’avouer vaincu devant une telle barrière, il doit absolument la franchir ; il lui faut une réponse à cette question qui lui est sans cesse posée par la vie : comment dois-je agir ? Mais la réponse à cette question ce n’est ni le déterminisme, ni la causalité, ni même la science pure qui sont capables de la fournir d’une façon pleinement satisfaisante ; c’est le sens moral, le caractère, la conception éthique du monde.

Conscience et fidélité, tels sont les guides que nous devons choisir non seulement sur le terrain scientifique, mais encore, bien au delà, dans tout le cours d’une vie qui a le souci d’être droite. On ne doit pas certes, en attendre de brillantes réussites immédiates, mais plutôt les biens les plus précieux auxquels puisse aspirer notre esprit, à savoir : la paix intérieure et la véritable liberté.

CHAPITRE IV

LA GENÈSE ET L'ÉVOLUTION DE LA THÉORIE DES QUANTA

Reportons-nous à une époque déjà vieille de vingt ans : c'est le temps où la notion de quantum d'action commence à se dégager pour la première fois de l'accumulation des faits expérimentaux. Elle n'a pas encore parcouru le chemin long et sinueux qui doit l'amener à l'état adulte et, considérant toute cette évolution, je ne puis m'empêcher d'évoquer le mot de Gœthe d'après lequel la course errante de l'homme dure aussi longtemps que son effort vers un but. Tout le travail et le zèle du chercheur ne pourrait lui apparaître que comme une tentative vaine et sans espoir s'il n'y avait, de temps en temps, certains faits de nature à lui prouver irréfutablement que le va-et-vient de ses démarches tâtonnantes lui a permis finalement de faire un pas de plus vers la vérité. Si elle n'est pas la garantie du succès, la poursuite d'un but déterminé n'en est pas moins la condition inéluctable.

Dans l'espèce, mon but, depuis longtemps, était d'arriver à résoudre le problème de la répartition de l'énergie dans le spectre normal de l'émission thermique.

Depuis que Gustave Kirchhoff avait montré que la structure du rayonnement émis à l'intérieur d'une enceinte close, formée

par un nombre quelconque de corps, dont la température est uniforme, est complètement indépendante de la nature de ces corps[1], on savait qu'il existe une fonction universelle reliant entre elles températures et longueurs d'ondes, et que pour la détermination de cette fonction, les propriétés spéciales d'aucune substance n'entrent pas en ligne de compte. Il était donc naturel de penser que la découverte de cette fonction remarquable serait susceptible de permettre d'élucider plus à fond la nature des relations existant entre l'énergie et la température, or c'est là le problème principal de la thermodynamique et par suite de toute là physique moléculaire. L'unique moyen pour arriver à résoudre ce problème consiste à choisir parmi tous les corps qui s'offrent à nous dans la nature, un de ceux dont nous connaissons le pouvoir d'absorption et le pouvoir d'émission et à calculer ensuite la structure de l'échange d'énergie thermique dont ce corps est le siège quand le régime stationnaire est établi. D'après la loi de Kirchhoff, la structure de cet état stationnaire doit être tout à fait indépendante de la nature du corps choisi.

Il me sembla que l'oscillateur rectiligne de Henri Hertz était un corps particulièrement approprié au but que je me proposais. Hertz venait, en effet, de donner une théorie complète des lois qui relient l'émission de son résonateur à la fréquence des oscillations[2]. Supposons maintenant un certain nombre de ces oscillateurs situés dans une enceinte fermée formée de parois réfléchissantes, ils émettront et recevront simultanément des ondes électromagnétiques et, par analogie avec ce qui se passe en acoustique dans le cas de résonateurs et d'oscillateurs qui

échangent de l’énergie, un état stationnaire doit finir par s’établir ; état assimilable à l’état stationnaire correspondant au rayonnement du corps noir. Je me pris à espérer d’une façon qui semblerait aujourd’hui un peu naïve qu’en appliquant les lois de l’électrodynamique classique je pourrais arriver à en déduire dans ses grandes lignes le comportement du phénomène, à condition de m’en tenir aux généralités et de m’abstenir d’hypothèses trop spéciales.

Je m’attachai donc tout d’abord à trouver les lois de l’émission et de l’absorption d’un résonateur rectiligne en me plaçant au point de vue le plus général possible. Pour cela je pris une voie détournée, j’aurais pu en effet abréger mon travail en m’appuyant sur la théorie électronique de H. A. Lorentz déjà connue dans ses grandes lignes ; mais je ne me fiais pas alors entièrement à l’hypothèse électronique, aussi je préférais m’en tenir à considérer l’énergie qui entre et qui sort d’une surface sphérique située à une distance donnée du résonateur. Naturellement, il ne s’agit ici que de phénomènes ayant lieu dans le vide, mais leur connaissance suffit pour permettre de tirer des conclusions en ce qui concerne les variations de l’énergie du résonateur lui-même.

Ceci me conduisit à une longue série de recherches dont quelques-unes purent être contrôlées par comparaison avec les résultats d’observations déjà effectuées, notamment avec les résultats des mesures d’amortissement dues à Bjerknes ; elles se trouvèrent confirmées[3]. Leur aboutissement fut l’établissement d’une relation générale entre l’énergie d’un

résonateur possédant une période propre et l'énergie du rayonnement spectral correspondant dans le champ entourant ce résonateur, quand le régime stationnaire est établi[4]. Le plus remarquable dans tout ceci fut que la relation trouvée ne dépendait aucunement de la nature du résonateur et que, notamment, elle était indépendante de sa constante d'amortissement. J'étais d'autant plus satisfait de ce résultat qu'il me permettait de simplifier tout le problème en remplaçant l'énergie du rayonnement par celle du résonateur. Au lieu d'avoir un système compliqué possédant un grand nombre de degrés de liberté, je n'avais plus qu'un système simple avec un seul degré de liberté.

Cependant tout ce que j'avais fait n'avait pas d'autre importance que celle d'un travail d'approche avant d'aborder le problème proprement dit dont le mystère restait inviolé, tel une cime majestueuse entourée de précipices. Ma première tentative échoua. J'avais espéré que le rayonnement du résonateur se distinguerait par une caractéristique quelconque du rayonnement absorbé, de telle sorte qu'on pourrait établir une équation différentielle ; or le résonateur réagissait seulement vis-à-vis des rayons qu'il émettait et il ne se montrait aucunement sensible aux radiations spectrales avoisinantes.

Je suggérai alors que le résonateur pourrait exercer une action unilatérale, donc irréversible, sur l'énergie du champ qui l'entoure, mais je m'attirai la contradiction énergique de L. Boltzmann[5]. Avec l'expérience plus mûre qu'il possédait

de ce genre de questions, il eut tôt fait de montrer que, d'après les lois de la dynamique classique, tous les phénomènes envisagés par moi pouvaient aussi bien avoir lieu dans un sens que dans l'autre, c'est-à-dire que l'onde sphérique émise par un résonateur pouvait, inversement, revenir à ce même résonateur sous la forme de surfaces sphériques se rétrécissant de plus en plus jusqu'à s'y absorber complètement. Le résonateur peut donc renvoyer dans l'espace l'énergie reçue par lui auparavant suivant la direction même dont cette énergie est venue. Si je pouvais, dans mon hypothèse du rayonnement, me passer de notions aussi singulières que celle d'ondes à sens unique, en introduisant une condition restrictive, il n'en restait pas moins vrai que toutes ces analyses montraient avec évidence l'absence d'un chaînon essentiel pour arriver à la solution complète de la question.

Il ne me restait donc plus, dans ces conditions, qu'à reprendre le problème en sens inverse, c'est-à-dire en me plaçant au point de vue de la thermodynamique, terrain sur lequel je me sentais plus à l'aise et comme chez moi. Mes recherches antérieures sur le second principe de la thermodynamique me furent, en effet, utiles en ce sens que j'eus tout de suite l'idée d'étudier, non point la température, mais l'entropie du résonateur en fonction de son énergie. À vrai dire, je n'étudiai pas l'entropie elle-même, mais seulement sa dérivée seconde par rapport à l'énergie ; parce que ce quotient différentiel est une mesure directe de l'irréversibilité du phénomène d'échange d'énergie entre le résonateur et le rayonnement ambiant. Cependant, comme ma tournure d'esprit était alors trop phénoméniste, je

ne me posai pas la question du rapport entre l'énergie et la probabilité et je m'en tins à la seule considération des résultats expérimentaux, Nous étions alors en l'année 1899 où la loi de répartition de l'énergie énoncée par Wien[6] suscitait le plus vif intérêt. Cette loi avait été contrôlée expérimentalement, d'une part, par Paschen à l'école supérieure de Hanovre et, d'autre part, par Pringsheim et Lummer à l'Institut impérial de Charlottenburg, indépendamment du premier. La loi de Wien exprime la relation existant entre l'intensité du rayonnement et la température au moyen d'une fonction exponentielle. Or en utilisant cette fonction pour calculer la relation entre l'énergie et l'entropie d'un résonateur, on arrive à ce résultat remarquable que l'inverse de la dérivée seconde dont nous avons parlé tout à l'heure (je désignerai dans la suite cet inverse par R) est proportionnel à l'énergie[7]. Cette relation extrêmement simple peut être considérée comme l'expression la plus adéquate de la loi de Wien, car au moyen de la loi du déplacement de Wien[8] la relation entre l'énergie et la longueur d'onde est immédiatement donnée quand on connaît la relation entre l'énergie et la température.

Comme tout le problème concerne une loi naturelle universelle et comme j'étais alors absolument convaincu (et je le suis encore aujourd'hui) qu'une loi doit être d'autant plus simple qu'elle est plus générale (bien qu'on ne puisse pas toujours dire avec certitude et définitivement quelle est la formule qui doit être considérée comme la plus simple), je crus pendant un certain temps que la proportionnalité de l'énergie à R était la véritable base de la loi de la répartition de l'énergie[9]. Mais

cette opinion se révéla bientôt être insoutenable, étant donné le résultat de mesures nouvelles. En effet, tandis que pour les faibles valeurs de l’énergie, c’est-à-dire pour les petites longueurs d’ondes, la loi de Wien se vérifiait très bien ; il y avait, par contre, des écarts notables entre le calcul et l’expérience dans le cas des grandes longueurs d’onde. Ceci fut montré tout d’abord par les expériences de Lummer et Pringsheim[10] et plus tard par celles de Rubens et Kurlbaum faites sur les rayons infra-rouges résiduels après le passage à travers du spath-fluor ou du sel gemme[11]. Dans ce dernier cas, ces auteurs montrèrent qu’il y avait une autre relation entre l’énergie et la grandeur R totalement différente de la loi de Wien, relation d’ailleurs susceptible de s’exprimer parfois d’une manière très simple. La grandeur R est alors, en effet, proportionnelle non plus à l’énergie mais à son carré, et cela avec une approximation d’autant plus grande que l’on a affaire à des énergies et à des longueurs d’ondes plus grandes[12].

Ainsi donc, l’expérience mettait en évidence deux limites très simples pour la fonction R : pour les petites longueurs d’onde proportionnalité à l’énergie, pour les grandes longueurs d’onde proportionnalité au carré de l’énergie. Rien de plus naturel alors que de mettre, dans le cas général, la valeur de R sous la forme d’une somme de deux termes contenant l’un la première puissance de l’énergie et l’autre la seconde puissance, et cela de telle façon que pour les petites valeurs de l’énergie le premier terme soit prépondérant et le second pour les grandes longueurs d’onde. C’est ainsi que j’arrivai à une formule du rayonnement qui s’est comportée d’une façon assez

satisfaisante au contrôle expérimental[13]. Il ne faudrait pas cependant tenir cette formule pour définitive, j'estime au contraire qu'il serait des plus souhaitable qu'on la soumit à un nouveau contrôle[14].

En tout cas, même si cette formule devait être pleinement vérifiée par l'expérience, elle ne pourrait jamais être considérée que comme une heureuse formule d'interpolation et elle n'aurait, à ce titre, qu'une valeur tout à fait limitée. C'est pourquoi je ne l'eus pas plutôt trouvée que je me mis en devoir d'en chercher la véritable signification physique. La question considérée sous cet angle m'amena à considérer les rapports entre l'énergie et l'entropie, en reprenant le point de vue de Boltzmann. Après quelques semaines qui furent certes remplies par le travail le plus acharné de ma vie, un éclair se fit dans l'obscurité où je me débattais et des perspectives insoupçonnées s'ouvrirent à moi.

Qu'il me soit permis de faire ici une légère digression. Selon Boltzmann, l'entropie est une mesure de la probabilité et le second principe de la thermodynamique consiste essentiellement à affirmer qu'un état se reproduit d'autant plus fréquemment dans la nature qu'il est plus probable.

Remarquons, d'autre part, qu'on ne mesure jamais directement des entropies, mais seulement des différences d'entropies. C'est pourquoi il y a toujours un certain arbitraire à parler d'entropie absolue d'un système. Et pourtant il convient d'introduire le concept d'une entropie absolue, définie d'une manière suffisante, car on peut arriver ainsi à formuler

certaines propositions d’une manière particulièrement simple. À mon avis, le cas de l’entropie est très semblable au cas de l’énergie, car l’énergie elle-même n’est pas mesurable, mais seulement la différence d’énergie. Ceci est tellement vrai qu’il y a un certain temps que l’habitude s’était introduite de ne plus calculer en termes d’énergie ; mais en termes de travail. Ainsi nous voyons Mach, — qui s’est beaucoup occupé du principe de la conservation de l’énergie, et qui est peut-être l’auteur qui a été le plus loin dans la voie de spéculations dépassant la portée de simples observations, — éviter de se servir du mot énergie.

De même, pour la thermochimie à ses débuts, on parlait toujours de chaleur de réaction, c’est-à-dire qu’on s’en tenait à des différences d’énergie. Cet état de choses dura jusqu’à ce que Wilhelm Ostwald eût fait observer, à juste titre, que de nombreuses considérations passablement complexes se trouvaient simplifiées si, au lieu d’utiliser des termes calorimétriques on calculait en énergie proprement dite. La constante qui figure dans l’expression de l’énergie resta tout d’abord indéterminée, mais elle finit par être calculée au moyen de la théorie de la relativité ; qui établit définitivement la proportionnalité de l’énergie et de l’inertie[15].

Pour l’entropie et, par conséquent, pour la probabilité physique il est possible de définir une valeur absolue en fixant, comme dans le cas de l’énergie, la valeur de la constante additive, ce qui se fait en annulant la valeur de l’entropie en même temps que celle de l’énergie (ou mieux de la température). Sur ces

bases, on peut alors calculer la valeur de la probabilité physique d'une répartition donnée de l'énergie dans un système composé de résonateurs. Ce calcul se fait par une analyse combinatoire assez simple et il conduit à une expression de l'entropie identique à celle qui est exigée par la loi du rayonnement[16]. À cette occasion j'eus la satisfaction particulièrement précieuse, après tant de désillusions, de voir Ludwig Boltzmann, dans la lettre qu'il m'écrivit quand je lui eus envoyé mon mémoire, se déclarer pleinement d'accord avec moi, tant sur les principes que sur toute la suite de mes déductions.

Pour effectuer le calcul numérique de la valeur de la probabilité, il est nécessaire de connaître deux constantes universelles qui possèdent chacune une signification physique bien déterminée. Comme on peut aussi calculer ces deux constantes en s'appuyant sur la loi du rayonnement, j'avais un moyen de vérifier si tout ce qui avait été fait antérieurement n'était pas qu'un simple artifice de calcul et s'il convenait de lui attribuer un sens physique. La première constante a un caractère plutôt formel et elle est en rapport avec la définition de la température. Si l'on définit la température comme étant l'énergie cinétique moyenne d'une molécule d'un gaz parfait, énergie qui est en soi extrêmement faible, la constante en question a pour valeur deux tiers[17]. Par contre, si l'on adopte l'échelle conventionnelle des températures, la même constante prend une valeur extrêmement faible et cette valeur est naturellement très étroitement liée à l'énergie d'une molécule unique. La connaissance de cette constante est donc une étape

dans le calcul de la masse d'une molécule et de toutes les grandeurs qui s'y rattachent. La constante en question a souvent été nommée constante de Boltzmann, bien qu'à ma connaissance, Boltzmann ne l'ait jamais introduite dans ses calculs, ce qui, entre parenthèses, à défaut d'affirmations explicites de sa part[18], suffirait à prouver que Boltzmann ne croyait pas du tout qu'il fût possible de mesurer exactement cette constante. Je ne crois pas qu'il soit possible de trouver un exemple plus saisissant des progrès gigantesques accomplis par l'art de l'expérimentation, que cette découverte de toute une série de méthodes pour mesurer la masse d'une molécule et cela avec une exactitude presque égale à celle avec laquelle on mesure la masse d'une planète.

À l'époque où j'effectuais mes calculs en m'appuyant sur la loi du rayonnement, on ne pouvait penser à une vérification exacte du nombre obtenu, la seule chose possible était de voir si l'ordre de grandeur trouvé correspondait bien à la réalité. Mais bientôt Rutherford et Geiger[19], en dénombrant directement les particules du radium, calculaient la valeur de la charge électrostatique de ces particules et la trouvaient égale à $4{,}65 \times 10^{-10}$ unités électrostatiques. Or, de mon côté, j'avais trouvé $4{,}69 \times 10^{-10}$, je considérais donc ce résultat comme une confirmation décisive de la valeur de ma théorie. Il convient cependant de signaler que par des méthodes plus récentes E. Regener et R. A. Millikan ont été conduits à attribuer une valeur un peu plus grande à la constante de Rutherford[20].

Il était bien plus malaisé de découvrir la signification de la deuxième constante universelle de la loi du rayonnement noir à laquelle mon premier calcul donnait pour valeur $6,55 \times 10^{-27}$ ergs-seconde, et que je désignais sous le nom de quantum élémentaire d'action, parce qu'elle était le produit d'une énergie par un temps. D'une part, en effet, cette constante était absolument nécessaire pour obtenir la véritable valeur de l'entropie, car c'est grâce à elle seule qu'on pouvait déterminer les domaines ou intervalles indispensables pour le calcul de la probabilité[21] et, d'autre part, il était absolument impossible, en dépit des plus grands efforts, de la faire rentrer dans le cadre d'une théorie classique, quelle qu'elle fût. Tant qu'on pouvait traiter la constante comme un infiniment petit, c'est-à-dire dans le cas des grandes énergies ou des longs intervalles de temps, tout allait fort bien ; mais, dans le cas général, il y avait toujours un moment où l'on aboutissait à une solution de continuité d'autant plus infranchissable qu'on avait affaire à des oscillations plus faibles et plus rapides. Devant l'échec de tous les essais destinés à combler l'abîme, il devenait de plus en plus impossible d'échapper au dilemme suivant : ou bien toute ma série de déductions aboutissant à retrouver par le calcul la loi du rayonnement noir était par principe illusoire et n'était rien d'autre qu'un artifice de calcul sans portée réelle, ou bien une idée correspondant à quelque chose de physiquement réel présidait à toute cette déduction et par suite le quantum d'action devait jouer un rôle fondamental en physique. Dans la seconde alternative ce quantum représentait donc quelque chose d'absolument nouveau,

d’insoupçonné jusqu’alors et qui semblait destiné à révolutionner une pensée physique basée sur la notion de continuité elle-même, inhérente à toutes les relations causales, depuis la découverte du calcul infinitésimal par Leibnitz et Newton.

L’expérience s’est prononcée pour la seconde alternative. Mais si la décision est intervenue aussi rapidement et aussi nettement ce n’est pas parce que la loi de répartition de l’énergie dans le rayonnement noir a été trouvée conforme à l’expérience et encore moins parce que j’ai élaboré une théorie spéciale de ce rayonnement. Si la question est aujourd’hui tranchée, cela est dû au travail infatigable des physiciens qui ont mis le quantum d’action au service de leurs recherches.

Le premier pas dans cette voie fut fait par l’introduction de quanta d’énergie régis par le quantum d’action qui permet d’expliquer très simplement un grand nombre de faits d’observation tels que la règle de Stokes, l’émission des électrons, l’ionisation des gaz[22] ; et que, d’autre part, si l’on assimile, quant à leurs expressions, l’énergie d’un système de résonateurs et celle d’un corps solide, il devient possible de calculer théoriquement une formule de la chaleur spécifique des solides qui donne très exactement la variation de cette chaleur, surtout quand la température s’abaisse[23]. Ce travail attira l’attention sur un grand nombre de questions intéressant des branches diverses de la physique et les recherches qui furent entreprises à cette occasion permirent avec le temps d’accumuler un matériel d’observation abondant et précieux. Je

ne puis naturellement pas donner ici une idée, même approximative, de ce qui a été entrepris dans cet ordre d'idées ; je me bornerai donc à retracer les étapes les plus caractéristiques de ce progrès dans les voies de la connaissance en physique.

Et tout d'abord en ce qui concerne les phénomènes chimiques et thermiques, la théorie sur la chaleur spécifique des solides qui repose sur l'hypothèse d'une vibration unique propre à chaque atome a été élargie par Th. von Kármán et M. Born[24], qui ont considéré le cas, plus approprié à la réalité, de plusieurs vibrations propres de nature différente. Enfin Debye, par une hypothèse hardiment simplificatrice concernant la nature des vibrations propres atomiques, est arrivé à établir une formule relativement simple au moyen de laquelle on peut retrouver, avec une exactitude très grande, les valeurs mesurées par Nernst et ses élèves pour les chaleurs spécifiques aux basses températures[25]. Cette formule aussi, chose remarquable, s'accorde bien avec les propriétés optiques et élastiques des mêmes corps. D'autre part, les quanta d'action ont pu être appliqués aux chaleurs spécifiques des gaz eux-mêmes. Déjà Nernst[26] avait attiré l'attention sur le fait qu'il doit y avoir un quantum d'action applicable à une rotation comme il y en a un pour une vibration et que, par suite, l'énergie de rotation des molécules gazeuses doit s'annuler aux basses températures, tout comme l'énergie oscillatoire. Les mesures d'Eucken sur la chaleur spécifique de l'hydrogène ont confirmé cette conclusion[27], et si les calculs de O. Stern et de P. Ehrenfest n'ont pas donné jusqu'ici de résultats entièrement satisfaisants,

cela doit sans doute être attribué à notre connaissance imparfaite du modèle structural de la molécule d'hydrogène. En tout cas, depuis les travaux de Bjerrum, E. v. Bahr, H. Rubens et G. Hettner sur les bandes d'absorption dans l'infrarouge, il est impossible de douter de l'existence de rotations dans les molécules gazeuses, rotations régies par des lois quantiques ; bien qu'une explication complète de ces remarquables spectres de rotation n'ait pas encore été donnée jusqu'ici.

Enfin, dès lors que toutes les propriétés d'affinité d'une substance sont conditionnées par son entropie, il est clair que le calcul quantique de cette entropie donne aussi la clef de tout ce qui concerne l'affinité chimique. La constante de Nernst, entre autres, qui est liée d'une manière caractéristique à la valeur absolue de l'entropie, a pu être retrouvée directement par le calcul grâce aux travaux de O. Sackur[28]. Ces travaux font appel aux mêmes procédés d'analyse combinatoire que j'avais déjà utilisés à propos des résonateurs. De même O. Stern et H. Tetrode, dont les travaux serrent de plus près les résultats des mesures expérimentales, ont pu calculer la différence des entropies à l'état solide et à l'état de vapeur en analysant le processus de vaporisation[29].

Dans tout ce qui précède, il n'a été envisagé jusqu'ici que des cas d'équilibre thermodynamique où les mesures ne fournissent que des moyennes statistiques se rapportant à un grand nombre de particules et à des grands intervalles de temps. La considération du choc des électrons va nous permettre de

pénétrer dans le dynamisme élémentaire des phénomènes en question. Dans cet ordre d'idées, J. Franck et G. Hertz, par leur détermination de ce que l'on appelle le potentiel de résonance ou par le calcul de la vitesse critique, c'est-à-dire de la vitesse minimum qu'un électron doit posséder pour provoquer l'émission d'un quantum de lumière dans son choc contre un électron, ont fourni une méthode de mesure du quantum d'action, telle qu'on n'en saurait imaginer de plus directe[30]. Enfin l'excitation du rayonnement caractéristique du spectre de Röntgen peut aussi servir de point de départ à des méthodes de calcul du quantum d'action, qui d'après les essais effectués par D. L. Webster et E. Wagner fournissent des résultats tout à fait concordants avec les précédents.

L'émission d'électrons par incidence de la lumière ordinaire, des rayons de Röntgen ou des rayons y sur la matière est le phénomène inverse de l'émission de quanta lumineux par le choc des électrons ; les quanta d'énergie déterminés par le quantum d'action et par la fréquence vibratoire pourront donc dans ce cas également jouer un rôle caractéristique. À lui seul le fait, si remarquable, que la vitesse des électrons ne dépend pas du tout de l'intensité du rayonnement incident[31], mais seulement de la couleur de la lumière[32] permettait de le soupçonner depuis longtemps, mais ce qui est bien plus remarquable c'est que les lois photoquantiques se sont trouvées vérifiées de point en point comme cela résulte des mesures effectuées par R. A. Millikan, sur la vitesse des électrons émis[33] et aussi des découvertes de E. Warburg sur

l’importance des quanta de lumière dans l’amorçage des réactions photochimiques[34].

Les résultats expérimentaux dont je viens de parler, qui se rapportent aux branches les plus diverses de la physique, constituent déjà un faisceau impressionnant de preuves en faveur de l’existence du quantum d’action ; mais c’est à la découverte et au développement de la théorie atomique de Niels Bobr que la théorie des quanta doit son fondement le plus solide. Cette théorie est, en effet, la première qui ait réussi en s’appuyant sur le quantum d’action à trouver une clef permettant de pénétrer dans le domaine mystérieux de la spectroscopie. Depuis la découverte de l’analyse spectrale, toutes les tentatives d’explication des phénomènes qu’elle avait révélée étaient restées vaines. Mais à peine la voie d’accès eut-elle été trouvée avec la théorie de Bohr qu’on assista à une véritable avalanche de connaissances nouvelles dans ce domaine et dans tous les domaines voisins de la physique et de la chimie. La première découverte sensationnelle fut l’explication théorique de la formule empirique de la série de Balmer dans le cas de l’hydrogène et de l’hélium. Cette découverte permettait de ramener la constante universelle de Rydberg à des grandeurs numériques bien connues[35]. Le léger écart des valeurs trouvées pour l’hélium et pour l’hydrogène devenait même une conséquence nécessaire de la théorie, par suite du léger mouvement dont devaient être animés les lourds noyaux atomiques. Enfin le succès obtenu dans le cas de l’hydrogène et de l’hélium ayant naturellement conduit à étudier d’autres séries dans le spectre de la lumière

ordinaire et dans le spectre des rayons X, le principe de combinaison de Ritz fut découvert et il se montra d'une fécondité extraordinaire. Or ce principe est aujourd'hui rattaché d'une façon tout à fait claire aux principes fondamentaux de la théorie des quanta.

Si malgré l'existence de telles coïncidences numériques, pourtant singulièrement probantes, quand on pense à la grande précision des mesures spectroscopiques, il se trouvait quelqu'un pour y voir une simple coïncidence fortuite, ses dernières hésitations devraient cependant cesser en voyant Sommerfeld démontrer que l'on peut étendre les lois de la répartition quantique aux systèmes doués de plusieurs degrés de liberté et tirer de cette extension, jointe à la considération de la variabilité de la masse inerte telle qu'elle résulte de la théorie de la relativité, cette formule véritablement merveilleuse, grâce à laquelle il n'y a plus de mystère dans les particularités les plus fines des spectres de l'hydrogène et de l'hélium[36]. Cette formule a été confirmée par les mesures les plus précises qui soient possibles à l'heure actuelle, celles de F. Paschen[37]. On peut dire sans exagération qu'il y a là un événement scientifique à mettre en parallèle avec la découverte de la planète Neptune. (L'astronome Leverrier, on le sait, en avait découvert non seulement l'existence, mais encore il avait calculé les éléments de sa trajectoire avant qu'aucun œil humain ne l'eût aperçue.) Les réussites ne s'arrêtèrent pas là, en progressant dans la même voie Epstein arriva à donner une explication pleinement satisfaisante de l'effet Stark (dédoublement électrique des raies spectrales[38]). Debye

donna aussi une explication simple de la série K du spectre de Röntgen qui avait été étudiée par Manne Siegbahn[39] et je passe sous silence un grand nombre d'autres travaux qui ont toujours eu pour résultat d'élucider plus ou moins les mystères de la structure atomique.

Quelle conclusion, le juge impartial qui ne veut pas se borner à un simple enregistrement des faits, doit-il tirer d'un pareil ensemble de résultats dont l'exposé complet aurait nécessité la citation d'un grand nombre de noms devenus aujourd'hui célèbres ? Je n'en vois pas d'autre que celle-ci ; le quantum d'action que l'on voit reparaître toujours avec la même valeur (6,54.10−27 ergs-seconde[40]) à propos des phénomènes les plus divers, est une grandeur qui a conquis pleinement le droit de cité parmi les constantes universelles et il est assez curieux de constater qu'au moment où l'idée de relativité se répand et connaît un succès vraiment triomphal, la nature révèle l'existence d'un absolu là où l'on s'y serait le moins attendu. Cet absolu est une unité de mesure effectivement invariable au moyen de laquelle on peut exprimer par un nombre, sans faire appel à aucune convention, la grandeur de l'action contenue dans un élément spatio-temporel donné ; ce qui donne à cette grandeur un caractère dont elle était complètement dépourvue auparavant.

L'introduction du quantum d'action en physique ne doit pas, il est vrai, être prise pour une véritable théorie des quanta. On peut même soutenir que nous sommes aussi éloignés de l'établissement de cette théorie qu'on l'était de posséder la

théorie optique de Maxwell à l'époque où Römer découvrait la non-instantanéité de la propagation de la lumière et en mesurait la vitesse. J'ai fait tout à l'heure allusion aux difficultés soulevées par l'introduction du quantum d'action dans la théorie classique ; avec les années ces difficultés se sont plutôt accrues qu'amoindries. Dans son élan impétueux, le flot de la recherche scientifique a certes, entre-temps, rencontré quelques-unes de ces difficultés et les a inscrites à son ordre du jour ; mais il en reste nombre d'autres qui ont été laissées de côté. L'existence de ces lacunes met tout esprit soucieux de systématique dans un état d'insatisfaction pénible.

Dans la théorie de Bohr il y a, en effet, tout un ensemble d'hypothèses qui sont à la base de toutes les lois d'action ; or ces hypothèses sont telles qu'aucun physicien n'eût hésité à les repousser, il y a seulement une génération. Qu'il y ait dans l'atome certaines trajectoires privilégiées déterminables par des lois quantiques, cela peut paraître à la rigueur acceptable, on voit déjà moins bien comment les électrons qui circulent sur ces trajectoires n'émettent aucune énergie. Mais que la fréquence, si parfaitement délimitée d'un quantum de lumière, puisse être différente de la fréquence de l'électron émetteur, voilà ce qui ne peut manquer de paraître au premier abord singulièrement hardi aux yeux de tout physicien imbu des théories de l'école classique, et presque incompatible avec tout ce qui se peut imaginer.

Mais les chiffres décident en dernier ressort et il en résulte que les rôles se sont peu à peu renversés. Dans les débuts le

problème paraissait se réduire à introduire, plus ou moins péniblement, un élément étranger dans un édifice dont la solidité était généralement reconnue comme indiscutable. Aujourd'hui c'est le nouveau venu qui a pris l'offensive après s'être introduit dans la place et il n'est pas douteux qu'il ne parvienne à disloquer la vieille construction. La seule question est de savoir par où commencera cette destruction et jusqu'où elle ira.

S'il est permis de se livrer, dès maintenant, à des conjectures sur l'issue de la bataille acharnée qui se poursuit actuellement, on peut dire qu'il est à prévoir que les grands principes de la thermodynamique, non seulement ne perdront pas leur position centrale dans la théorie des quanta, mais qu'ils seront au contraire généralisés. L'hypothèse adiabatique de P. Ehrenfest[41] joue vis-à-vis de la théorie des quanta un rôle analogue au rôle des expériences purement conceptuelles de la thermodynamique classique et, de même que pour arriver à mesurer l'entropie, R. Clausius a formulé l'hypothèse de la possibilité pour deux états quelconque d'être reliés l'un à l'autre par une série de processus réversibles, de même aussi les idées de Bohr nous fournissent un moyen analogue de pénétrer dans le monde mystérieux dont il nous a donné la clef.

Une des questions dont l'élucidation apporterait, à mon avis, beaucoup de clarté à l'ensemble de la théorie est la suivante : que devient l'énergie d'un quantum quand l'émission est terminée ? Est-ce que l'énergie se propage ensuite dans toutes les directions, au sens de la théorie ondulatoire de Huyghens en

occupant un volume de plus en plus grand ? Ou bien est-ce qu'elle est projetée dans une seule direction comme le voudrait la théorie de l'émanation de Newton ? Dans le premier cas, jamais un quantum ne serait plus en état de concentrer son énergie dans un espace suffisamment petit pour pouvoir détacher un électron de l'atome auquel il appartient. Dans le second cas, il faudrait sacrifier ce qui a le plus contribué au triomphe de la théorie de Maxwell : la continuité entre le champ statique et le champ dynamique, continuité qui, seule, a permis d'expliquer les phénomènes d'interférence jusque dans leurs moindres détails. Comme on le voit, chacune des deux alternatives entraîne des conséquences aussi peu satisfaisantes que possible pour le théoricien de la physique.

Mais, dans cette question comme dans toutes les autres, il n'est pas douteux que la science finira par trouver la solution et que l'on cessera d'être prisonnier d'un dilemme redoutable. Quand ce moment sera arrivé, ce qui ne nous paraît pas satisfaisant aujourd'hui, sera regardé comme s'harmonisant d'une façon particulièrement heureuse à l'ensemble parce qu'on aura su trouver un point de vue plus élevé permettant de le mieux embrasser. En attendant que ce but soit atteint, le problème du quantum d'action ne cessera de stimuler et de féconder la recherche scientifique. L'importance qu'il aura eue pour l'approfondissement de notre savoir en physique sera mesurée à la grandeur des difficultés qui auront dû être surmontées pour arriver à la solution.

ANNOTATIONS

Les références bibliographiques qui suivent n’ont aucunement la prétention d’être complètes, elles ne pourront servir que pour une première orientation.

G. Kirchhoff : Sur le rapport existant entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant des corps pour la chaleur et la lumière. Recueil de ses œuvres, p. 597 (p. 17). Leipzig, J. A. Barth (1882).

H. Hertz : Ann. d. Physik, vol. 36, p. 1 (1889).

Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. du 20 févr. 1896. Ann. d. Physik, vol. 60, p. 577 (1897).

Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. du 18 mai 1899, p. 455.

L. Boltzmann : Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. du 5 mars 1898, p. 182.

W. Wien : Ann. d. Physik, vol. 58, p. 662 (1896).

D’après la loi de répartition de Wien la relation entre l’énergie U {\displaystyle \mathrm {U} } U d’un résonateur est donnée par la formule

U = a · e − b T {\displaystyle \mathrm {U} =a\cdot e^{-{\frac {b}{\mathrm {T} }}}} $$\mathrm{U} = a \cdot e^{-\frac{b}{\mathrm{T}}}.$$

Si S {\displaystyle \mathrm {S} } S désigne l’entropie du résonateur, on a :

$$\frac{1}{\mathrm{T}}=\frac{d\mathrm{S}}{d\mathrm{U}}.$$

Il en résulte que la grandeur R du texte a pour valeur

$$\mathrm{R}=1:\frac{d^{2}\mathrm{S}}{d\mathrm{U}^{2}}=-b\mathrm{U}.$$

D’après la loi du déplacement de Wien l’énergie d’un résonateur est liée à sa fréquence propre ν par la formule

$$\mathrm{U}=\nu\cdot f\left(\frac{\mathrm{T}}{\nu}\right).$$

Ann. d. Physik, vol. 1, p. 719 (1900).

O. Lummer et E. Pringsheim : Verhandl. d. Deutsch. Physik. Gesell., vol. 2, p. 163 (1900).

H. Rubens et F. Kurlbaum : Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. du 25 octobre 1900, p. 929.

Pour les grandes valeurs de T on a, d’après H. Rubens et F. Kurlbaum $\mathrm{U}=c\mathrm{T}$

mathrm {U} =c\mathrm {T} } $\mathrm{U} = c\mathrm{T}$ et, par suite, en opérant comme au no 7 :

R = 1 : d 2 S d U 2 = − U 2 c {\displaystyle \mathrm {R} =1:{\frac {d^{2}\mathrm {S} }{d\mathrm {U} ^{2}}}=-{\frac {\mathrm {U} ^{2}}{c}}}

$$\mathrm{R} = 1 : \frac{d^2\mathrm{S}}{d\mathrm{U}^2} = -\frac{\mathrm{U}^2}{c}.$$

Si l'on pose alors :

R = 1 : d 2 S d U 2 = − b U − U 2 c {\displaystyle \mathrm {R} =1:{\frac {d^{2}\mathrm {S} }{d\mathrm {U} ^{2}}}=-b\mathrm {U} -{\frac {\mathrm {U} ^{2}}{c}}}

$$\mathrm{R} = 1 : \frac{d^2\mathrm{S}}{d\mathrm{U}^2} = -b\mathrm{U} - \frac{\mathrm{U}^2}{c}.$$

il en résulte par intégration :

1 T = d S d U = 1 b log ⁡ (1 + b c U) {\displaystyle {\frac {1}{\mathrm {T} }}={\frac {d\mathrm {S} }{d\mathrm {U} }}={\frac {1}{b}}\log \left(1+{\frac {bc}{\mathrm {U} }}\right)}

$$\frac{1}{\mathrm{T}} = \frac{d\mathrm{S}}{d\mathrm{U}} = \frac{1}{b}\log\left(1 + \frac{bc}{\mathrm{U}}\right)$$

d'où l'on tire la formule de rayonnement :

U = b c e b T − 1 {\displaystyle \mathrm {U} ={\frac {bc}{e^{\frac {b}{\mathrm {T} }}-1}}}

$$\mathrm{U} = \frac{bc}{e^{\frac{b}{\mathrm{T}}} - 1}.$$

Cf. W. Nernst et Th. Wulf : Verh. d. Deutsch. Physik. Ges., vol. 21, p. 224 (1919).

La valeur absolue de l’énergie est en effet égale au produit de la masse inerte par le carré de la vitesse de la lumière.

Verh. d. Deutsch. Physik. Ges. du 14 décembre 1900, p. 237.

La formule générale qui donne l’énergie moyenne d’une molécule de gaz est, si k {\displaystyle k} k représente la première constante du rayonnement

U = 3 2 k T {\displaystyle \mathrm {U} ={\frac {3}{2}}k\mathrm {T} } $$\mathrm{U} = \frac{3}{2} k \mathrm{T}$$.

Si l’on pose T = U {\displaystyle \mathrm {T} =\mathrm {U} } $\mathrm{T} = \mathrm{U}$ on a k = 2 / 3 {\displaystyle k=2/3} $k = 2/3$. Par contre dans l’échelle conventionnelle des températures (absolues selon Kelvin), T {\displaystyle \mathrm {T} } T est défini de telle façon que ta différence de température entre l’eau bouillante et la glace fondante est posée égale à 100.

Cf. par ex. L. Boltzmann : « En souvenir de Joseph Lohschmidt ». Ouvrages de vulgarisation, p. 245, 1905.

E. Rutherford et H. Geiger, Proc. Roy. Soc. A, vol. 81, p. 62 (1908).

Cf. R. A. Millikan : Phys. Ztschr., vol. 14, p. 796 (1913).

Le calcul de la probabilité d'un état physique repose, en effet, sur le dénombrement du nombre fini des cas particuliers également probables, par lesquels l'état considéré est réalisé et, pour la délimitation séparative de ces cas particuliers, il faut adopter un point de vue déterminé en ce qui concerne la notion de chaque cas particulier. A. Einstein : Ann. d. Physik, vol. 17, p. 132 (1905).

A. Einstein : Ann. d. Physik, vol. 22, p. 180 (1907).

M. Born et Th. v. Kármán : Phys. Ztschr., vol. 14, p. 15 (1913).

P. Debye : Ann. d. Physik, vol. 39, p. 789 (1912).

W. Nernst : Phys. Ztschr., vol. 13, p. 1064 (1912).

A. Eucken : Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss., p. 141 (1912).

O. Sackur : Ann. d. Physik, vol. 36, p. 958 (1911).

O. Stern : Phys. Ztschr., vol. 4, p. 629 (1013) ; Tetrode : Ber. d. Akad. d. Wiss. v. Amsterdam, 27 février et 27 mars 1915.

J. Franck et G. Hertz : Verhandl. d. Deutsch. Physik. Ges., vol. 16, p. 512 (1914).

Ph. Lenard : Ann. d. Physik, vol. 8, p. 149 (1902).

R. Ladenburg : Verh. d. Deutsch. Physik. Ges., vol. 9, p. 504 (1907).

R. A. Millikan : Phys. Ztschr., vol. 17, p. 217 (1916).

Warburg : Sur l'échange d'énergie dans les réactions photochimiques des gaz. Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. depuis 1911.

M. Born : *Phil. Mag.*, vol. 30, p. 394 (1915).

A. Sommerfeld : Ann. d. Physik, vol. 51, pp. 1 et 125 (1916).

F. Paschen : Ann. d. Physik, vol. 50, p. 901 (1916).

P. Epstein : Ann. d. Physik, vol. 50, p. 480 (1916).

P. Debye : Phys. Ztschr., vol. 18, p. 276 (1918).

E. Wagner : Ann. d. Physik, vol. 67 (1918) ; R. Ladenburg : Jahrb. d. Radioaktivität u. Eleletronik, vol. 17, p. 144 (1920).

P. Ehrenfest : Ann. d. Physik, vol. 51, p. 327 (1916).

CHAPITRE V

LA LOI CAUSALE ET LE LIBRE ARBITRE

Le libre arbitre et la loi de causalité ! Question aussi ancienne que l'intime effort de tout homme sérieux et réfléchi pour accorder ensemble la conscience de sa propre dignité morale et la conviction qu'un ensemble de lois rigoureuses régit tout le fonctionnement du monde intérieur comme du monde extérieur.

Il se manifeste ici pourtant, au premier abord, un contraste tel qu'on en peut guère concevoir de plus tranché. D'une part, la course des faits qui se succèdent selon d'inflexibles règles dans la nature comme dans la vie de l'esprit, condition première de toute connaissance scientifique et fondement pratique de toutes nos actions. D'autre part, la certitude enracinée en nous par notre propre conscience, c'est-à-dire par la source de connaissance la plus immédiate qui puisse exister, que nous sommes maîtres, en fin de compte, de nos pensées et décisions propres ; que nous avons la possibilité, à tout instant, d'agir de telle façon ou de telle autre, sagement ou follement, bien ou mal. Comment accorder ces deux choses ? Et pourtant, chacun de nous fait partie, sans conteste, du grand univers et par suite se trouve soumis à ses lois comme tous les autres êtres. Le

nombre des investigations et l’abondance des pensées que les esprits les plus pénétrants chez tous les peuples civilisés ont consacrés à ce problème est tout simplement sans limites comme, en regard, le nombre des solutions proposées.

Je n’ambitionne pas d’ajouter une spéculation de plus à toutes celles qui se sont exercées dans ce domaine ; mais je crois avoir mon mot à dire et ce qui m’amène à le penser, c’est la constatation d’un fait aussi manifeste que troublant.

Après tout ce qui a été pensé et écrit au cours des siècles sur le problème en question, on devrait pouvoir affirmer, que si nous ne sommes pas parfaitement capables de le résoudre, nous en approchons d’autant plus que tous les penseurs sont parvenus à se mettre d’accord sur certains de ses points fondamentaux. Or ce que nous constatons en réalité, c’est plutôt le contraire. Il y a déjà longtemps que l’importance de la loi de causalité dans la nature et dans le monde spirituel, le sensible et le suprasensible, le libre-arbitre et le serf-arbitre n’avaient pas donné lieu à d’aussi violentes discussions que de nos jours et l’on peut dire, que sur tout cela, dans une large mesure, il règne à présent une obscurité des moins réjouissantes. On dirait presque que l’humanité pensante se partage sur cette question en deux camps adverses. Dans le premier camp ceux que préoccupe avant tout la science : ils voient dans une causalité rigoureuse, même pour les phénomènes spirituels, un postulat indispensable à la recherche scientifique et, par suite, ils n’hésitent pas à payer, du sacrifice même de leur libre arbitre,

une intelligence totale des secrets que recèle en ses profondeurs la constitution de l’univers.

Dans l’autre camp, ceux que leur nature porte plutôt à l’action : leur sens intime se révolte contre cette exigence qui les rabaisse au rang de pâles automates en les soumettant à la tyrannie de lois rigides et, par suite, ils prétendent que le libre arbitre est le bien suprême de l’homme doué de pensée et ils voudraient restreindre aussi fortement que possible, sinon rejeter complètement, comme cela leur semblerait préférable, l’application de la loi de causalité, tout au moins dans le domaine de la vie supérieure de l’âme.

Entre les deux camps s’agite un nombre encore plus grand d’esprits hésitants et circonspects. Ils sentent confusément, mais avec force, que les deux partis, en un certain sens, pourraient bien avoir raison ; et cela les empêche d’adhérer complètement à l’un ou à l’autre. En quel point néanmoins, dans sa marche, leur pensée s’écarte-t-elle de celle des deux adversaires ? Ils ne le voient pas clairement, parce qu’ils ne voient rien de décisif à opposer soit aux arguments logiques des uns, soit aux arguments moraux des autres. Ainsi poursuivent-ils, avec toute l’attention convenable, mais non sans quelque crainte et quelque secret malaise, la pénétration lente, mais constante et sûre de la recherche scientifique. Il y a longtemps que celle-ci ne se laisse plus arrêter par la frontière qui sépare le monde des corps et celui de l’esprit et chacun, selon ce qu’il sait et ce qu’il peut, cherche de son mieux, mais sans y réussir pour de bon, un retranchement solide derrière

lequel la conscience qu'il a de son libre arbitre puisse se sentir à l'abri des incursions du déterminisme pur et simple.

En présence d'un état de choses si profondément troublant, peut-être ne sera-t-il pas sans intérêt qu'un représentant de l'exacte exploration de la nature expose ce qu'il peut dire sur le problème en question, du point de vue de la science qu'il cultive et dont la méthode, à coup sûr, mérite à un très haut degré la qualification de positive.

I

Pour nous mettre sur la piste d'une solution réellement satisfaisante de notre problème, demandons-nous d'abord quelles sont, tout à fait en général, la signification et la valeur de la loi de causalité.

La notion de cause nous vient de la vie ordinaire et apparaît dès lors en premier lieu comme la plus simple du monde. Tout ce qui advient a une ou plusieurs causes qui, toutes ensembles, traînent après elles, comme effet, l'événement considéré. Inversement, on peut considérer tout événement comme la cause d'un ou plusieurs autres qui s'ensuivent nécessairement. C'est sur ce principe que nous réglons toute notre activité pratique. Il nous est entré dans la chair et le sang, par un exercice de tous les jours et de toutes les heures, d'une façon si complète que nous l'appliquons, pour ainsi dire, à demi inconsciemment.

Si quelqu'un, pour nous en tenir à un exemple tout à fait trivial, étant assis tranquille dans sa chambre, entend à l'improviste un bruit insolite, le voilà qui tourne la tête pour chercher la cause de ce bruit. Lorsque, contre son attente, ce regard ne le lui fait pas découvrir, il suppose qu'elle se trouve peut-être dans une autre chambre de la maison, peut-être aussi dehors, dans la rue, peut-être aussi plus loin encore et si rien de tout cela ne peut aller, il se voit amené, en fin de compte, à penser qu'il s'agit d'une illusion subjective des sens, d'une hallucination.

Que se passera-t-il cependant (car il faut une bonne fois se le demander) s'il est impossible de prendre en considération aucune de ces possibilités ? Est-il donc désormais tout à fait décidé, sans que l'on puisse aucunement penser autre chose, que tout événement dans tous les cas doit avoir une cause naturelle ? Se heurterait-on à une contradiction logique si l'on voulait écarter complètement une fois de sa pensée l'enchaînement des causes ? Un instant de réflexion montre qu'il faut donner résolument à cette question une réponse négative. Nous pouvons très bien, en effet, penser qu'un bruit entendu n'a pas de cause naturelle. En pareil cas, nous parlons de prodige, ou encore de sorcellerie. C'est assez déjà d'alléguer l'existence d'une littérature mondiale, riche et considérable, sur ce sujet pour nous convaincre que le prodige est parfaitement concevable. Oui, nous pouvons sans difficulté concevoir que tout aille pour ainsi dire sens dessus dessous dans le monde, nous pouvons concevoir que demain, pour changer, le soleil se lève à l'Ouest ; nous pouvons concevoir et nous représenter, sans excepter aucun détail, que dans un instant la porte de notre

chambre s’ouvre et laisse entrer, en chair et en os, quelque personnage historique depuis longtemps disparu.

Pour insensée et impossible que puisse nous apparaître, du point de vue du réel, l’arrivée d’un tel événement qui se joue comme celui-là de toute causalité, cette impossibilité doit pourtant être distinguée d’une impossibilité logique ou d’un contre-bon sens comme, par exemple, qu’une partie d’une chose quelconque puisse jamais être plus grande que le tout. Cela, même avec la meilleure volonté, il n’est pas possible de le penser, car cela contient en soi-même une contradiction. Aussi est-ce une nécessité, pour notre pensée, de considérer ce genre de choses comme impossible, tandis qu’une infraction à la loi de causalité peut fort bien s’accorder avec la logique formelle. De là, pour nous, cette conséquence importante que, touchant l’application de la loi de causalité dans le monde réel, il n’y a rien à trouver par les voies de la logique pure.

Le réel, à vrai dire, quoique souvent on admette précisément le contraire, n’est qu’un canton tout à fait spécial de l’immense domaine que nos pensées ont le pouvoir d’embrasser. On ne saurait objecter, là contre, que notre imagination, en dernière analyse, se lie constamment à notre expérience du réel, car cette expérience est en vérité le point de départ de toute pensée ; mais nous possédons, en outre, le don de nous élancer par la pensée au-dessus du réel, Sans cette faculté de notre imagination, nous n’aurions jamais ni poésie ni art. Elle est notre bien le plus élevé, le plus précieux, c’est elle qui souvent, lorsque la grisaille de la vie quotidienne pèse sur nous d’une

façon par trop insupportable, nous fait évader vers des régions plus lumineuses.

Bien plus, l'austère recherche de la science ne peut avancer, elle aussi, que par le libre jeu de l'imagination. Qui ne peut, à l'occasion et ne serait-ce qu'une fois, concevoir des choses contraires à la loi causale, jamais n'enrichira la science d'une idée nouvelle. Et ce n'est pas seulement la construction des hypothèses qui suppose une pensée capable de s'affranchir de la servitude causale, c'est aussi l'invention de formules définitives pour les résultats acquis à la science.

Un simple exemple tiré de la physique va nous le faire mieux comprendre. Imaginons un rayon lumineux issu d'une source lointaine et réduite à un point : quelque chose comme une étoile brillante. Ce rayon nous arrive à travers autant de milieux transparents que l'on voudra, tous différents de forme et de nature, tels que l'air, le verre, l'eau, etc., et il atteint enfin notre œil. Quel chemin la lumière va-t-elle prendre pour venir de l'étoile à l'œil ? En général, sûrement pas la ligne droite, puisque la lumière se réfracte chaque fois qu'elle passe d'un milieu dans un autre, mais au contraire un chemin d'autant plus compliqué que les corps interposés seront plus nombreux et plus divers. Rien que dans l'atmosphère, le trajet de la lumière est très complexe parce que l'air aux diverses altitudes est diversement réfringent. Mais toutes les questions qui se posent ainsi à la fois se trouvent réglées d'une façon parfaitement exacte par ce principe remarquable que la lumière partie de l'étoile choisit toujours entre toutes les voies dont elle dispose,

précisément celle qui doit la conduire jusqu'à notre œil dans le minimum de temps, de telle sorte que nous n'avons à considérer que les vitesses diverses avec lesquelles la lumière chemine à travers les divers milieux. C'est ce qu'on appelle le « principe du temps minimum ».

Or ce principe fécond n'aurait aucun sens si nous l'étions pas en état d'imaginer aussi pour la lumière des cheminements qui ne se présentent en aucune façon dans le réel et sont, dès lors, causalement impossibles. Tout se passe comme si la lumière possédait une certaine intelligence et poursuivait le louable dessein d'atteindre aussi rapidement que possible son but fixé d'avance. Ajoutez qu'elle n'a jamais le temps de reconnaître, en fait, différentes voies possibles et doit au contraire se décider immédiatement pour la plus rapide. Il y a dans la physique plus d'un cas semblable, par exemple, celui des mouvements dits virtuels qui n'obéissent pas aux lois dynamiques et par suite, du point de vue causal, sont également impossibles. Ils jouent malgré cela un rôle important dans la théorie ; ils ne contredisent donc aucune loi de la pensée.

II

Nous voici donc convaincus que la loi de causalité ne fait aucunement partie des conditions de notre pensée. C'est à ce moment que se pose, et d'autant plus digne d'attention, la question de l'essence propre de la causalité et celle de la valeur de la loi causale, dans le domaine du monde réel. D'une façon très générale, nous pouvons définir la causalité comme la loi

d’interdépendance des événements qui se succèdent dans la durée. Reste à savoir si cette idée d’interdépendance trouve son fondement dans la nature même des choses ou si elle n’est pas, en totalité ou en partie, un produit de notre imagination, un procédé inventé par l’homme, à l’origine, pour se retrouver dans la vie pratique et devenu par la suite indispensable pour lui. Avant tout, l’interdépendance causale est-elle absolument parfaite, irréfragable ou bien laisse-t-elle quelquefois place à des lacunes, à des solutions de continuité ?

Le première chose à faire est d’essayer de tirer au clair ces questions par la seule réflexion systématique. En fait, c’est ainsi que les ont traitées, des siècles durant, les esprits les plus éminents parmi ceux que l’histoire de la philosophie rassemble en donnant à leur commune tendance le nom caractéristique de « rationalisme ». Il nous est facile de comprendre ici que tout dépend du point de départ choisi ; car rien ne naît de rien et, sans antécédents déterminés, aucune conséquence généralement ne peut suivre. C’est pourquoi les philosophes du rationalisme s’attachent d’abord pour la plupart à l’Être par excellence absolument déterminant, à la Divinité, après quoi ils déduisent de ses attributs la réponse aux problèmes fondamentaux qui les intéressent. On ne saurait considérer, en aucune façon, les attributs de la divinité, comme connus et définis ; tout au contraire, les conceptions idéales les plus élevées revêtent des couleurs très différentes selon les différentes personnalités qui les introduisent dans le cercle de leurs pensées. Il s’ensuit que es résultats obtenus sont très différents aussi, ou, en d’autres termes, que chaque système

philosophique de ce genre reflète seulement, en fin de compte, l'image personnelle et religieuse que son auteur se fait de l'univers.

D'après René Descartes, souvent présenté comme le père de la philosophie moderne, Dieu a créé toutes les lois de la nature et de l'esprit par un acte de sa libre volonté pour des fins si élevées que notre humaine pensée n'est pas capable d'en saisir toute la valeur. Aussi le système cartésien n'exclut-il nullement les miracles ni les mystères.

À l'opposé, le dieu de Baruch Spinoza est un dieu de l'harmonie et de l'ordre. Il pénètre tout ce qui se passe dans l'univers de telle sorte que la loi de l'interdépendance causale universelle doit être tenue elle-même pour divine et par conséquent absolument parfaite et irréfragable. Aussi n'y a-t-il place dans le monde de Spinoza pour aucun hasard, pour aucun miracle.

Le dieu de Guillaume Leibnitz a derechef construit originellement tout l'univers sur un plan dont l'unité répondait à sa suprême sagesse ; en même temps il incorporait à chaque chose, d'avance et une fois pour toutes, les lois de son activité, de sorte que maintenant chacune se comporte et se développe uniquement par son être propre sans dépendre, au fond, en aucune autre manière d'autre chose. Aussi chez Leibniz, toute action réciproque d'une chose sur l'autre n'est-elle qu'apparente.

Ce fut donc le signe d'un progrès décisif que l'apparition, en face des conceptions rationalistes assez naïves que nous

considérions à l'instant, d'un courant d'idées plus sceptiques venu d'Angleterre et qui commençait à faire son chemin, sous le nom d'empirisme. Il se caractérise, avant tout, par cette doctrine qu'il n'existe pas d'idées innées ni de connaissances déterminées et assurées d'avance telles que le rationalisme est obligé d'en supposer ; mais que notre âme, au moment de notre naissance est comme une page blanche où l'expérience écrira les premières lettres. Il n'y a, par suite, qu'une seule chose qui nous apporte quelque connaissance du monde extérieur et intérieur et c'est aussi la seule dont nous puissions parler tant soit peu avec assurance : nos expériences personnelles et, avant tout, les perceptions de nos consciences. Elles constituent donc le seul fondement solide, inattaquable de toutes nos pensées, son point de départ, le propre matériel dont notre intelligence et notre imagination se servent pour travailler. Ce que nous percevons comme chaud ou froid, comme bleu ou rouge, dur ou mou, nous en avons la certitude immédiate sans qu'une définition spéciale soit nécessaire ou même possible. On parle souvent, il est vrai, d'illusions des sens, comme par exemple dans le cas d'un mirage extraordinaire ; mais cela ne veut pas dire que la perception soit fausse : seules sont fausses les conclusions que nous tirons de la perception donnée. Ce qui nous trompe c'est notre intelligence et non pas nos sens.

La perception elle-même est quelque chose d'entièrement subjectif, aussi n'avons-nous pas le droit de conclure des perceptions sensibles, sans plus, aux objets perçus. La couleur verte n'est pas une propriété de la feuille, mais bien une particularité de la perception que nous éprouvons en voyant la

feuille. Il en va de même pour tous nos autres sens. Écarte-t-on toutes les perceptions sensibles il ne reste, à vrai dire, absolument rien des objets.

Chez Locke le toucher semble jouer un rôle privilégié par rapport aux autres sens. Cela tient à ce que Locke attribue aux corps eux-mêmes les propriétés mécaniques comme l’épaisseur, l’étendue, la forme, la mobilité que ce sens nous révèle en eux, tandis que les empiristes postérieurs, en particulier David Hume, plus logiquement, considèrent les propriétés mécaniques comme subjectives aussi.

À la lumière de ces conceptions, le monde dit extérieur se résout en un complexe de perceptions et la loi de causalité ne veut rien dire de plus qu’une régularité expérimentale démontrée dans l’enchaînement de nos perceptions successives et nous devons l’accepter comme quelque chose de donné qui échappe à toute autre analyse, mais qui peut aussi, à tout moment, prendre fin.

Si une bille de billard se mouvant avec rapidité heurte une autre bille et la met en mouvement, il en résulte, sur nos sens, deux impressions distinctes et consécutives : celle de la première bille en marche et celle de la deuxième bille en marche. Une observation répétée permet d’établir et d’enregistrer des lois précises qui régissent leurs rapports mutuels. Ainsi, par exemple, la vitesse de la bille heurtée dépend de la vitesse et de la masse de la bille heurtante. Nous pouvons en outre découvrir des phénomènes qui se rattachent à ceux-là suivant certaines lois de dépendance, par exemple, le

bruit que le choc des billes nous fait entendre ou l’aplatissement momentané qui se produit sur les deux billes à l’endroit où elles se heurtent, aplatissement que nous pouvons rendre visible en revêtant une des deux billes d’un enduit coloré qui s’enlève au choc, mais ce ne sont toujours que des impressions sensibles différentes qui se placent les unes à côté des autres ou s’intercalent suivant certaines lois ; elles nous sont données telles quelles et ne peuvent en aucune façon se déduire les unes des autres.

Même quand nous parlons d’une force, que la bille en mouvement exerce sur l’autre, nous n’introduisons ainsi qu’un concept analogique qui repose sur la sensation que nous éprouvons dans nos muscles lorsque nous heurtons la bille initialement immobile, non plus avec la bille en mouvement mais avec la main. Le concept de force s’est révélé comme utile au plus haut point pour formuler la loi du mouvement ; mais, par lui-même, il ne fait pas avancer la science d’un seul pas. Tout point d’appui nous manque, en effet, pour parler d’un lien proprement causal et intérieur ou seulement d’une sorte de pont logique qui unirait entre eux les divers phénomènes du mouvement. Deux perceptions distinctes sont toujours distinctes et demeurent distinctes, si nombreuses que puissent être les relations que l’on établisse entre elles.

Par suite, tout le contenu de la loi de causalité, prise en son fondement, se réduit à la proposition suivante : des complexes de perceptions identiques ou semblables étant donnés comme cause, il s’ensuit constamment, comme effet, des complexes de

perceptions identiques ou semblables. Sur quoi se pose la question : Que doit-on considérer comme semblable ? et elle requiert pour chaque cas particulier un examen spécial. Ainsi formulé le concept de cause se trouve dépouillé de tout sens plus profond, quoique l'importance pratique de la loi de causalité, en tant qu'elle ouvre à l'homme pensant des vues sur l'avenir, subsiste et demeure sans diminution essentielle.

Comment expliquer cependant que, dans la vie ordinaire, nous concevions l'interdépendance causale des phénomènes comme quelque chose d'objectif et qui ne dépend pas de nous et que nous y voyons, en fait, beaucoup plus qu'une simple succession de sensations personnelles dans un ordre régulier ? Les sceptiques dans leur système répondent : Par l'énorme efficience de cette conception dès qu'il s'agit d'atteindre un but, jointe à la puissance de l'habitude. Il n'est certes pas facile d'estimer assez haut les innombrables effets que l'habitude peut produire. Dès notre plus jeune âge, elle influence notre sensibilité, notre pensée et notre vouloir. Ce que nous avons coutume de voir, nous croyons aussi le comprendre. Quand un événement nouveau et imprévu se produit devant nous pour la première fois, nous pouvons être étonnés à l'extrême ; si nous le voyons pour la dixième fois, nous le trouvons naturel et nous chercherons peut-être à démontrer qu'il ne pouvait pas ne pas se produire.

Il y a cent ans, la technique des transports ne connaissait comme source de force que l'homme et les animaux. Par suite, on ne croyait pas possible qu'il y en eût d'autres. Quels

savoureux effets Fritz Reuter a tiré, dans son *Voyage à Belligen*, de l'étonnement où le brave paysan Karl Witt se trouve plongé, la première fois qu'il voit passer, sur une voie ferrée, une locomotive, si bien qu'il parie n'importe quoi qu'un cheval est caché dedans. Nos jeunes gens d'aujourd'hui, élevés au milieu des machines à vapeur et des moteurs électriques, ne peuvent plus guère goûter l'humour de cette manifestation naïve de la tendance que nous avons naturellement d'assigner à chaque fait sa cause.

Jusqu'ici, la théorie des sceptiques sur la nature de l'interdépendance causale des choses est donc compréhensible et justifiée. Examinons toutefois maintenant d'une façon plus exacte où cette théorie nous mène en fin de compte, si nous continuons à la suivre réellement, rigoureusement dans toutes ses conséquences. Avant tout, il faut considérer que lorsque nous parlons des perceptions immédiates de la conscience comme de l'unique source de la connaissance c'est toujours exclusivement de notre conscience propre qu'il s'agit. Que les autres hommes aient aussi des perceptions, nous ne pouvons que le conjecturer par analogie ; mais non le savoir immédiatement et, pas davantage, en fournir la preuve logique. Cela devient encore plus clair quand nous descendons de l'animalité supérieure à l'animalité inférieure et au monde des plantes, en nous demandant à chaque échelon si des perceptions y existent. Ou bien il nous faut admettre quelque part, plus ou moins arbitrairement, une interruption de la faculté de percevoir, ou bien nous devons accorder que les plantes et même, comme beaucoup le veulent, les êtres

inanimés la possèdent. Qu'il soit impossible d'établir sur des fondements rigoureux une pareille théorie, cela est de toute évidence. Si nous voulons procéder d'une façon parfaitement logique et sans rien d'arbitraire, il ne nous reste donc qu'à demeurer fermes sur le terrain de nos perceptions propres. La loi de causalité apparaît alors comme une règle expérimentale qui attache les unes aux autres nos diverses perceptions propres ; mais sans que nous puissions naturellement jamais savoir si, l'instant d'après, la chaîne ne sera pas rompue. Nous devons donc, à vrai dire, nous attendre constamment à quelque prodige.

Que le prodige se laisse très bien concevoir et imaginer, nous nous sommes déjà amplement expliqués là-dessus en commençant et nous pouvons en avoir effectivement l'expérience dans nos rêves de chaque nuit. Si nous voulons cependant continuer à être logiques, il nous faut aller plus loin et avouer que le rêve ne se distingue, en général, en rien de la réalité, par aucun signe caractéristique. La loi de causalité ne peut ici nous servir de rien, car elle ne saurait y posséder plus qu'ailleurs une valeur sans limite et, à regarder les choses de près, il est fort possible d'avoir en rêve des perceptions causalement coordonnées. La force des perceptions ne saurait être, elle non plus, un signe décisif, car il est notoire que certains rêves font sur l'âme une impression à peine plus faible que celles des réalités. Qui donc, en me lisant, peut démontrer qu'il me lit autrement qu'en rêve ? Que l'on ne dise pas davantage qu'un songe se manifeste comme tel par son interruption soudaine au réveil. On peut aussi rêver que l'on

s'éveille et pourtant continuer de rêver. Il pourrait fort bien arriver qu'une personne eût régulièrement, chaque nuit, un songe qui fût causalement la suite du songe fait la nuit précédente. Un pauvre être de cette sorte mènerait une vie en partie double et ne saurait jamais, avec quelque certitude, de quel côté la réalité se trouve et de quel côté le rêve. Nous le voyons, à s'en tenir à la pure logique, tout le système philosophique ordinairement désigné sous le nom de « solipsisme » ne peut être pris en défaut sur aucun point. Le solipsiste pose son moi au centre de tout ce qui peut arriver et être connu, il tient pour réel et indubitable tout ce qu'il éprouve et rien que cela, tout le reste est à ses yeux dérivé et secondaire. Pour le solipsiste, régulièrement, chaque soir, au moment précis où il s'endort, le monde disparaît sans bruit pour renaître, sans bruit de même, le lendemain matin et chose en vérité remarquable, tel exactement, que, si pendant la nuit, il avait cessé d'exister.

Il suffit d'approfondir quelque peu ces singulières idées pour les écarter aussitôt comme absurdes et inadmissibles. En réalité, tout se passe précisément en sens contraire. Le monde ne donnerait pas un fifrelin pour que le solipsiste dorme ou veille et, même si ce personnage fermait les yeux pour toujours, le monde en prendrait à peine connaissance tout en poursuivant, immuable, sa route ordinaire.

Devant des conséquences aussi monstrueuses, les sceptiques les plus radicaux s'effrayent eux-mêmes et reculent. Ils se replient toujours et, à vrai dire, il n'en saurait être autrement,

sur la base d'une sorte de compromis entre les exigences de la raison humaine et les déductions purement logiques du point de vue qu'ils représentent. Il est d'un intérêt spécial de suivre cela dans le détail et de chercher chaque fois à quel endroit leur pensée dévie de la ligne droite.

Ainsi Georges Berkeley conclut à peu près de la façon suivante : Parmi nos impressions sensibles, il y en a qui se produisent sans et même contre notre volonté ; il faut donc que ces impressions aient leur origine ailleurs qu'en nous-mêmes. Ici la loi de causalité est appliquée de la sorte tout à fait naïvement à la genèse des sensations alors que, d'autre part, les sensations doivent pourtant être l'unique donnée et que, en admettant expressément qu'il puisse y avoir des prodiges, on s'interdit radicalement de parler d'une application universelle de la loi de causalité. Comme Berkeley était d'une nature profondément religieuse, il ne pouvait manquer de faire apparaître comme cause dernière de toute sensation et, par là même, de toutes choses en général un Créateur tout-puissant et parfaitement bon duquel on peut faire dériver tout le reste selon l'usage et, une fois de plus, exactement à la façon des rationalistes.

Résumons-nous. Voici, à peu près, comment nous pouvons exprimer le résultat de ces considérations : l'empirisme sceptique est, en logique pure, inattaquable dans ses principes et complètement irréfutable aussi dans ses déductions ; mais, développé complètement en culture pure, il aboutit en fin de compte irrésistiblement à une impasse : le solipsisme. Veut-on

échapper à celui-ci ? on n'a plus d'autre ressource que de sauter résolument de côté à quelque endroit, de préférence dès le début, et d'introduire une hypothèse métaphysique que ne postulent pas immédiatement les impressions sensibles et que l'on ne tire pas, non plus, par des déductions logiques.

C'est le mérite impérissable d'Emmanuel Kant, fondateur du criticisme, que d'avoir, le premier, clairement reconnu cette vérité et fait sciemment le pas sauveur. D'après Kant les impressions sensibles données par la conscience ne sont pas le seul moyen que nous ayons d'acquérir la connaissance : la raison y ajoute quelque chose du sien en tant qu'elle tire d'elle-même, indépendamment de toute expérience, certains concepts : les catégories, dont l'usage est la condition nécessaire pour que, d'une façon générale, des connaissances puissent être acquises. Il est d'importance pour notre problème que, parmi les catégories kantiennes, la loi de causalité figure et aussi qu'elle y apparaisse comme un jugement synthétique *a priori* dont voici à peu près le contenu : « Tout ce qui arrive suppose quelque chose d'où cela résulte conformément à une règle. » Cette proposition, selon Kant, vaut en dehors de toute expérience. Mais sa réciproque n'est pas toujours vraie, c'est-à-dire que toutes les choses qui se succèdent régulièrement ne sont pas pour autant dans un rapport de cause à effet. Y a-t-il rien qui se succède plus régulièrement, par exemple, que le jour et la nuit ? Or on ne trouvera personne pour croire que le jour est la cause de la nuit. La régularité absolue n'est donc pas, chez Kant, comme chez les sceptiques, équivalente à l'interdépendance causale. Dans l'exemple que nous venons de

citer, elle tient uniquement à ce que les deux phénomènes sont les effets d'une seule et même cause qui est la rotation de la terre jointe à l'opacité du globe terrestre pour les rayons solaires.

De cette façon donc, la question de l'application universelle de la loi de causalité serait résolue par l'affirmative. On ne saurait pourtant méconnaître que la doctrine kantienne, pour satisfaisante et concluante qu'elle apparaisse dans la plupart de ses résultats, comporte, malgré tout, à cause de sa structure dogmatique, un certain arbitraire et l'on comprend sans peine que, dans la suite des temps, elle n'ait pas seulement subi des changements et des développements, mais aussi des attaques directes.

Il me faut, bien entendu, renoncer à toute tentative pour exposer ici, ne fût-ce qu'à grands traits, l'évolution de la causalité dans la philosophie post-kantienne ; que l'on me permette d'en relever seulement quelques marques particulièrement saillantes. Les plus sérieux adversaires du système kantien se sont élevés du côté des philosophes qui se faisaient scrupule de se risquer un peu trop loin sur le terrain métaphysique. Que l'on ne puisse pas se passer complètement de la métaphysique sans sombrer, à la fin, irrémédiablement dans le solipsisme, nous l'avons déjà vu plus haut et, à cet égard, tout système qui veut échapper tout ensemble à la métaphysique et au solipsisme, présente quelque part une lacune d'ordre logique dont nous ne pouvons ici parler avec détail : cela nous entraînerait trop loin. Mais, à de telles

lacunes, des constructions prévoyantes peuvent toujours donner un aspect assez peu frappant.

Tandis que la doctrine de Kant, et avec elle tout le reste de la philosophie transcendantale de l'idéalisme absolu au matérialisme radical, s'enracine dans le sol métaphysique de la façon que nous venons de dire, le positivisme, fondé par Auguste Comte, cherche, tout au contraire, en ses diverses nuances et perfectionnements à se garder le plus possible des influences métaphysiques ; d'autant qu'il n'admet comme source légitime de connaissance que les expériences et la conscience exclusivement. D'après lui, la causalité n'a aucun fondement dans la nature des choses elles-mêmes, elle n'est, pour parler bref, qu'une invention de l'esprit humain, et si le rôle qu'elle joue a tant d'importance, c'est qu'elle a fait ses preuves comme extrêmement utile et pratique pour les hommes. La loi de causalité n'est que la mise en œuvre de cette invention. Nous connaissons toujours avec une exactitude parfaite tout ce que nous avons nous-mêmes inventé, la signification du concept de cause perd donc ainsi toute obscurité ; mais aussi demeure-t-il toujours possible qu'un jour, en tel où tel cas, l'invention se trouve inutilisable et que la loi de causalité ne joue pas. Que si, dans son système, Kant déclare impossible la connaissance sans causalité parce que la raison se crée, avant toute expérience, la catégorie du concept de cause, cette raison créatrice, considérée à la lumière du positivisme, n'est tout de même que la raison humaine et son œuvre est et demeure l'œuvre des hommes. L'homme est la mesure de toutes choses, disait déjà Protagoras. Nous avons

beau faire et nous tourner de tous les côtés, nous ne parvenons pas un seul instant à sortir de notre peau et, si hardies que puissent être nos incursions dans le domaine de ce que nous appelons l'absolu, elles ne se meuvent toutes, en vérité, qu'à l'intérieur du cercle délimité, pour nous, par l'ensemble de nos faits de conscience.

Pour incontestablement concluantes en un certain sens que ces réflexions paraissent, on peut leur faire bien des objections au point de vue de la philosophie transcendantale. À chaque thèse succède ainsi son antithèse, par un changement sans cesse renouvelé, et la chanson n'aboutit qu'à renforcer cette vérité que nous connaissons déjà d'avance : la question de l'essence et de l'application universelle de la loi de causalité ne peut pas être résolue par la réflexion d'une façon décisive et que tout le monde reconnaisse pour telle. La théorie transcendantale et la théorie positiviste sont inconciliables et le resteront tant qu'il y aura des cerveaux indépendants et qui philosopheront.

III

Dans ces conditions nous n'avons plus guère d'espoir, semble-t-il, de voir jamais s'ouvrir devant nous la perspective de résoudre notre problème d'une façon satisfaisante. Ou bien pourtant n'y a-t-il pas encore un chemin de salut, une issue à ce cercle désolé ? N'est-il pas possible de découvrir encore une solution que l'on soit en droit de considérer comme décisive ?

Nous avons assurément encore un endroit où une issue pourrait se trouver, un endroit que nous n'avons pas pris jusqu'ici

particulièrement en considération. Interrogeons la science. Se divise-t-elle en multiples branches à l'égard de notre question comme la philosophie dans ses multiples systèmes opposés l'un à l'autre ?

À vrai dire, on pourrait objecter ici préalablement qu'un problème de philosophie ne saurait être résolu par les sciences particulières ; que la philosophie traite précisément les questions concernant les principes et les conditions d'existence des sciences particulières ; que l'activité de la philosophie doit ainsi précéder, dans tous les cas, celle de la science et que si les sciences particulières entreprenaient de dire leur mot sur les questions de philosophie générale, ce serait empiéter d'une façon illicite sur le domaine philosophique.

Quiconque juge de la sorte méconnaît à mon avis l'importance du travail que la science et la philosophie opèrent ensemble. Tout d'abord, il y a lieu de considérer que le point de départ et les moyens d'investigation sont, au fond, tout à fait les mêmes dans les deux domaines.

Le philosophe, en effet, ne travaille nullement avec une espèce particulière d'intelligence et il ne puise à nulle source autre que les idées issues de son expérience journalière et de sa formation scientifique ; les idées qui diffèrent d'après ses penchants individuels et son évolution personnelle. À certains égards, même, le savant lui est de beaucoup supérieur, car il dispose, dans son domaine spécial, d'un matériel de faits beaucoup plus riche, rassemblé par observation ou expérimentation et passé systématiquement au crible. En revanche, le philosophe a de

meilleurs yeux pour contempler les ensembles universels qui n'intéressent pas immédiatement le savant et que, par suite, ce dernier omet plus aisément d'observer.

La différence entre les deux sortes d'études pourrait, dans une certaine mesure, se comparer à celle qui existerait entre les occupations de deux compagnons de voyage debout côte à côte et examinant tous deux attentivement un paysage étranger, complexe et de vaste horizon, celui-ci d'un regard libre d'errer partout à sa guise, celui-là avec une longue-vue solidement fixée dans une direction précise. Le premier ne voit pas aussi distinctement le détail ; mais il peut, d'un seul coup d'œil, embrasser à la fois l'unité et la diversité de l'ensemble et, par suite, comprendre mieux un certain nombre de choses, tandis que le second découvre beaucoup plus de particularités ; mais ne possède, par contre, qu'un champ de vision relativement étroit sans pouvoir embrasser du regard tout le paysage. Tous deux, en se complétant l'un l'autre, peuvent se rendre de précieux services.

Naturellement, cette comparaison cloche comme toute autre, elle peut toutefois mettre en lumière la vocation et l'aptitude unique de la philosophie à formuler un problème déterminé et reconnu par elle comme fondamental ; mais aussi l'impossibilité où elle se trouve de le résoudre tout à fait sans équivoque, à moins de se procurer des informations par une enquête auprès des sciences particulières. Si le résultat de cette enquête venait à dicter une solution absolument déterminée, on pourrait incontestablement tenir cette solution pour décisive.

C’est, en effet, le trait caractéristique d’une vraie science que ses découvertes s’imposent d’une façon générale, objective pour tous les temps et tous les peuples ; d’où il suit que ses résultats exigent qu’on les reconnaisse sans réserve et, en fin de compte, ils y parviennent toujours. Les progrès de la science ne sont pas moins décisifs et il devient à la longue impossible de les ignorer.

C’est ce qui apparaît d’une façon particulièrement évidente dans le développement pris par les sciences de la nature.

Que l’homme de nos jours, grâce à la télégraphie sans fil, envoie toutes les nouvelles qu’il veut jusqu’aux endroits du globe les plus éloignés en une minuscule fraction de seconde ; que, grâce aux avions, il s’élève dans les airs et survole de très haut les cimes des montagnes aussi bien que les mers ; que, grâce aux rayons de Röntgen, il explore l’intérieur de tous les êtres vivants et détermine même la position de chaque atome dans un cristal : voilà des opérations objectives de la science et de la technique, engendrées par elles et qui donnent des centaines de démentis au vieux Ben Akiba ; et devant lesquelles s’effondrent le savoir, tant vanté, de tous les sages, les artifices exercés durant des siècles par tous les mages et les enchanteurs. Qui voudrait encore, en présence de si palpables succès, fermer les veux et déraisonner sur un effondrement de la science ne mériterait pas qu’on le réfute et ne ferait que se rendre ridicule. Quelle autre manière, en effet, d’administrer la preuve qu’il s’agit ici d’un véritable progrès dans la connaissance si ce n’est par l’examen des résultats qui sont

sous nos yeux ? La seule marque à laquelle on puisse reconnaître sans erreur la valeur de n'importe quelle sorte de travail est et reste cette fois encore dans les fruits qu'elle a donnés.

La compétence et l'efficacité de la méthode scientifique pour traiter le problème qui nous occupe étant ainsi reconnues, il nous est permis de poser, en outre, la question suivante : Comment la science procède-t-elle, en fait, dans ses diverses branches ? Et, qu'on prenne garde, il s'agit ici de la science elle-même et non des fondements qu'elle peut avoir dans la philosophie ou dans la théorie de la connaissance. S'occupe-t-elle des perceptions sensibles et relatives données immédiatement par la conscience et de leur mise en œuvre systématique suivant les lois de la pensée ou bien, de cette source première de nos connaissances, passe-t-elle aussitôt au-dehors par une sorte de saut sur le terrain de la métaphysique ? Sur la réponse à cette question, mon avis ne peut faire de doute pour aucun esprit impartial : elle est, pour chaque science particulière, en faveur de la seconde alternative. Bien plus, on est en droit de dire que c'est précisément au rejet de toute considération égocentriste ou anthropocentriste et là seulement que commence chaque science, au sens propre du mot. Primitivement, en effet, l'homme pensant tirait à soi et à ses intérêts toutes ses perceptions sensibles et tout ce qui s'y rattache. Les forces de la nature qu'il se figurait douées d'une âme comme la sienne, il les classait en bienveillantes ou hostiles, les plantes en vénéneuses et inoffensives ; les animaux, en redoutables et paisibles. Aussi longtemps qu'il

s’obstina dans cette attitude intellectuelle, il ne put arriver à une véritable science. C’est seulement quand il se mit à laisser hors de jeu, pour l’amour de la connaissance pure, ses intérêts immédiats, lorsqu’il se crut lui-même et, plus tard aussi, la planète qu’il habite, fort loin d’être le centre de l’évolution universelle, lorsqu’il se retira sur des positions plus modestes de l’observateur qui écoute, guette attentif, et doit se tenir aussi tranquille que possible à l’arrière-plan pour influencer aussi peu que possible les propriétés des objets qu’il scrute et le cours des événements qu’il observe ; alors seulement le monde extérieur commença de lui révéler ses secrets et lui livra de la sorte, en même temps, les moyens de plier la nature à son service, moyens qu’il n’avait jamais réussi à découvrir par la voie directe : nous en avons déjà rencontré plus haut quelques exemples.

Or ce qui vaut dans le domaine de la nature, ne peut que se trouver juste d’abord pour la vie de l’esprit. Le fondement et la condition préalable de toute science véritable et féconde est l’hypothèse, indémontrable à vrai dire en logique pure, mais que la logique ne pourra non plus jamais renverser, de l’existence d’un monde extérieur, subsistant aussi, complètement indépendant de nous et duquel nous ne pouvons directement prendre connaissance par nos sens particuliers, mais seulement comme s’il s’agissait d’un objet étranger, observable seulement à travers des lunettes qui le revêtiraient, pour chaque observateur, d’un coloris quelque peu différent. Il ne nous viendrait guère à l’esprit, en pareil cas, d’attribuer à nos lunettes toutes les propriétés de l’image par nous perçue,

bien plus, nous apporterions alors le plus grand soin à tenir compte, autant que possible, pour nous former une opinion sur cet objet, des colorations produites par les lunettes : de même, avant tout, pour penser d'une façon véritablement scientifique, nous sommes tenus de reconnaître et de maintenir jusqu'au bout la distinction entre le monde extérieur et le monde intérieur.

Justifier spécialement ce saut dans le transcendantal, c'est de quoi les sciences particulières ne se sont jamais préoccupées et elles ont bien fait. Premièrement, en effet, elles n'auraient certainement pas, sans cela, progressé si vite et, secondement, ce qui est d'une importance fondamentale encore plus grande, elles n'ont pas à craindre qu'on s'en prévale jamais contre elles avec succès, dès lors que des questions de ce genre ne peuvent aucunement se résoudre par des procédés rationnels.

Certes, la maxime positiviste que l'homme est la mesure de toute chose, est irréfutable en tant que l'on ne peut empêcher personne, en, vertu de principes logiques, de rapporter toutes choses à cette mesure humaine et de réduire, en fin de compte, à un complexe de perceptions tout ce qui se passe dans l'univers ; mais il existe encore une autre mesure, beaucoup plus importante pour certaines questions, indépendante de la manière d'être et d'agir de l'intellect qui mesure, et propre aux choses elles-mêmes. Cette mesure, à vrai dire ne nous a pas été immédiatement donnée ; mais nous cherchons à la découvrir et quand nous ne devrions jamais atteindre complètement le but idéal, nous nous en rapprochons du moins sans cesse par un

travail ininterrompu. Chaque pas, sur ce chemin, trouve son salaire, comme l’histoire de chaque science nous l’apprend, dans mille succès divers. La science admet donc l’existence d’un monde extérieur subsistant en soi et, tout aussitôt, elle y rattache la question de la causalité, c’est-à-dire des lois qui régissent tout ce qui se passe dans l’univers, en tant que concept tout à fait indépendant de nos perceptions sensibles ; et elle se fait un devoir de rechercher si, et jusqu’à quel point, la loi de causalité est applicable dans la nature et dans le monde de l’esprit aux divers faits qui s’y produisent.

Nous le voyons, la science se trouve ici exactement au point que Kant a pris pour origine de sa théorie de la connaissance. Comme dans la philosophie kantienne, ainsi dans chaque science particulière, le concept de cause appartient aux catégories sans lesquelles la connaissance, en général, ne peut être acquise. Par contre, il existe une certaine différence, en ce sens que Kant ne pose pas seulement le concept de causalité, mais aussi, dans une certaine mesure, le contenu de la loi de causalité, comme immédiatement donné par l’intuition et, par suite, comme universellement valable. Cette démarche, les sciences particulières ne peuvent pas la faire avec lui. Bien plus, elles doivent se réserver d’examiner, dans chaque cas particulier, ce que signifie la loi de causalité et de remplir peu à peu d’un contenu fécond, grâce à la recherche inductive, la forme, vide en soi, du concept de cause.

IV

Nous voilà donc mis en demeure, pour avancer vers la solution de notre problème d'explorer à tour de rôle les sciences particulières et d'examiner à fond leur position en ce qui concerne la question de l'application universelle et sans exception de la loi de causalité. Il va de soi qu'il ne peut être question ici que d'une exploration rapide, quelques pas avec des bottes de sept lieues.

Commençons par la plus exacte des sciences naturelles, la physique. Dans la dynamique classique, où nous pouvons inclure aussi bien la mécanique, y compris la théorie de la gravitation, que l'électrodynamique de Lorentz et de Maxwell, la loi de causalité s'exprime par une formule qui, pour l'exactitude et la précision, s'approche dans une certaine mesure du but idéal décrit par nous plus haut. Cette formule consiste en un certain système d'équations mathématiques en vertu duquel tous les processus ayant lieu dans un système physique donné sont complètement déterminés dès que l'on en connaît les conditions limites spatiales et temporelles, c'est-à-dire l'état initial et les influences extérieures agissant sur le système. Il en résulte qu'il est possible de déterminer à l'avance par le calcul tous les phénomènes qui auront lieu dans le système, jusque dans leurs moindres particularités, et ainsi de déduire l'effet de la cause.

Le dernier progrès important de la dynamique est tout récent, il a été réalisé par la théorie de la relativité généralisée, grâce à laquelle la gravitation newtonnienne a fusionné intimement

avec l'inertie de Galilée. On a généralement coutume d'interpréter la théorie de la relativité à un point de vue positiviste et de l'opposer en un certain sens à la philosophie transcendantale. Mais c'est tout à fait à tort, car le fondement de la théorie de la relativité généralisée ne réside pas en ce que toutes les données spatiales et temporelles ne possèdent qu'une signification relative au système de référence adopté par l'observateur ; elle réside au contraire en ce que dans la diversité spatiale et temporelle de l'univers à 4 dimensions, il existe une grandeur, la distance entre deux points infiniment proches l'un de l'autre, que l'on appelle déterminant métrique (*Massbestimmung*) qui, pour tous les observateurs effectuant les mesures et pour tous les systèmes de référence utilisés, conserve la même valeur, de telle sorte qu'elle revêt un caractère transcendantal indépendant de toute volonté humaine.

L'hypothèse des quanta a, sans doute, jeté quelque trouble récemment dans cet harmonieux système de la physique et l'on ne saurait encore prévoir aujourd'hui exactement l'influence que le développement de cette hypothèse aura sur la conception des lois physiques fondamentales ; quelques modifications essentielles semblent devenir indispensables. Aucun physicien, cependant, ne doute que l'hypothèse des quanta trouvera son exacte expression dans certaines équations qui pourront valoir comme formule plus exacte du principe de causalité.

Mais la physique connaît en dehors des lois dynamiques rigoureuses et qui jouent dans tous les cas, d'autres lois encore, dites lois statistiques. Ces lois n'ont qu'un caractère de

probabilité et souffrent exception en certains cas. L’exemple classique en cette matière est la transmission de la chaleur. Quand deux corps, de températures inégales, se touchent, l’énergie thermique passe conformément au second principe de la théorie de la chaleur, toujours du plus chaud au plus froid. Nous savons aujourd’hui fort bien que ce principe n’exprime qu’une simple probabilité. Il peut très bien arriver, surtout si la différence de température des corps qui se touchent est extrêmement petite, qu’un échange inverse de chaleur vienne à se produire, allant du plus froid au plus chaud, en un point spécial et à un instant particulier. Le second principe de la théorie de la chaleur, comme toutes les lois statistiques, n’a donc pas son exacte portée dans chaque cas distinct, mais seulement lorsqu’il s’agit d’une moyenne entre de nombreux phénomènes de même nature. Si on veut l’appliquer à des cas particuliers, on n’est plus en droit de parler d’autre chose que d’une certaine probabilité.

Ici nous sommes dans un cas tout à fait analogue à ce qui se passe quand on joue avec un dé non symétrique. Si l’on fait rouler un dé dont le centre de gravité n’est pas au centre de figure mais sensiblement plus près d’une des six faces, il est très probable, mais non tout à fait certain, qu’à l’arrêt cette face va se trouver en dessous. Moins le centre de gravité sera éloigné du centre de symétrie, plus le résultat sera douteux. Pour exprimer la loi statistique, ici dominante, il faut jeter le dé très souvent, coup sur coup. Le nombre de coups qui donne le résultat probable et le nombre total des coups se trouvent

respectivement dans un rapport tout à fait précis, déterminé par la position du centre de gravité.

Et maintenant, pour en revenir à la transmission de la chaleur : est-ce que la loi de causalité, en tant qu'elle s'applique avec rigueur et s'étend à tous les phénomènes particuliers, y trouve une limite ? En aucune façon. Des recherches plus poussées, en effet, ont fait voir que ce que nous appelons transmission de la chaleur d'un corps à un autre est un phénomène extrêmement compliqué que l'on peut décomposer en une multitude d'autres phénomènes distincts, indépendants les uns des autres et très petits : les mouvements moléculaires ; et, de plus, elles ont montré que si nous supposons les lois dynamiques valables pour chacun de ces minuscules phénomènes en particulier, ce qui implique une causalité rigoureuse, cela nous mène tout justement aux lois de probabilité que l'observation constate. Si les règles de statistique cessent de s'appliquer en certains cas, cela ne tient donc pas à ce que la loi de causalité soit violée, mais bien à ce que nos observations ont beaucoup trop peu de finesse pour servir à l'examen direct de cette loi. Si nous étions en situation de suivre le mouvement de chaque molécule séparément nous trouverions la preuve que les lois dynamiques s'y appliquent exactement.

C'est pourquoi l'on distingue en physique deux sortes d'observations ; l'observation macroscopique, plus grossière, sommaire et l'observation microscopique, plus détaillée. Il n'y a de hasard et de probabilité que pour l'observateur macroscopiste ; et leur grandeur, leur importance dépendent

essentiellement des connaissances sur lesquelles il s’appuie, tandis que l’observateur microscopiste ne voit partout que certitude et rigoureuse causalité. Le premier ne compte que par addition de valeurs, il ne connaît que des lois statistiques, le second compte par valeurs isolées et leur applique les lois dynamiques dont le sens est parfaitement précis. Si nous considérions microscopiquement le coup de dés, pris par nous pour exemple tout à l’heure, c’est-à-dire si nous connaissions exactement dans chaque cas particulier, outre la structure du dé, sa position et sa vitesse initiales, aussi bien que les influences extérieures du dessus de la table et de la résistance de l’air, il ne serait plus question de hasard ; mais nous serions chaque fois en mesure de calculer avec précision le lieu et la position dans lesquels, en fin de compte, le dé s’arrêterait.

Il n’est pas besoin d’exposer ici, plus en détail, que la science physique, en ce qui concerne tous les phénomènes du monde moléculaire et atomique, cherche à nous ramener autant que possible de la méthode macroscopique, qui s’offre toujours naturellement la première en ce domaine, à la méthode microscopique et, par suite, des lois statistiques à l’application sévère et rigoureusement causale des lois dynamiques. L’on peut dire, par conséquent, que la physique, à qui nous sommes en droit de joindre ici l’astronomie, la chimie et la minéralogie, prend comme base, dans tous ses domaines l’application rigoureuse de la loi de causalité.

Nous en venons maintenant aux lois biologiques. Ici les relations sont beaucoup plus compliquées, de ce fait surtout,

que deux concepts nouveaux entrent en jeu : celui de la vie et celui de l'évolution qui ont suscité dès longtemps à la recherche scientifique les plus grandes difficultés. Il me sera permis cependant, quoique je ne puisse plus, sur ce chapitre, parler comme spécialiste, d'affirmer sans hésiter que la recherche biologique, elle aussi, et précisément en ses parties les plus obscures comme, par exemple, la théorie de l'hérédité, en vient de plus en plus à admettre l'existence universelle de relations strictement causales. Un hasard au sens absolu, ou ce qui revient au même, un prodige, c'est ce que la physiologie ignore tout autant que la physique quoique, à vrai dire, la méthode microscopique soit pour elle de beaucoup plus difficile à pratiquer jusqu'au bout. Aussi la plupart des lois physiologiques sont-elles du genre statistique et dénommées règles. Quand on observe des exceptions à ces règles empiriquement constatées, on ne les attribue pas à une violation de la loi de causalité, mais à l'insuffisance de nos connaissances en ce qui concerne les conditions sur lesquelles repose l'application de la règle, et la science n'a ni cesse ni repos qu'elle n'ait fait là-dessus d'une façon ou d'une autre la lumière. Il n'est pas rare alors, qu'en éclairant ce point, elle éclaire en même temps à l'improviste d'autres questions qui s'y rattachent et qu'elle constate ainsi dans une nouvelle direction les effets de l'interdépendance causale universelle. C'est la voie qui a conduit à mainte découverte importante.

Comment distinguer cependant l'interdépendance causale d'une simple régularité, toute extérieure, d'une succession constante de faits ? Il n'existe généralement pour cela aucun

critérium décisif. Ce que l'on peut établir, ce n'est jamais, en fin de compte, que l'application universelle et sans exception d'une loi qui nous permet de prédire avec assurance les effets que doit produire une cause donnée.

Une anecdote contée, si je ne m'abuse, par Benjamin Franklin, illustre assez joliment ce que je viens de dire. On sait que Franklin ne fut pas seulement un grand homme d'État, mais aussi un naturaliste et un inventeur de génie. À une certaine époque, il eut l'occasion de s'occuper du problème de la fertilisation artificielle du sol par les engrais. Il en prévoyait clairement l'importance pour l'agriculture et il avait déjà obtenu quelques succès pratiques avec un engrais au plâtre. Il ne put toutefois réussir de longtemps à convaincre ses voisins, hostiles à toutes les nouveautés que la végétation luxuriante de son champ de trèfle avait pour cause première l'engrais artificiel. À la fin, il se rabattit pour le leur prouver par le fait, sur le procédé que voici : Au temps des semailles, il traça sur le sol en bêchant son champ de trèfle, des sillons linéaires, étroits et longs auxquels il donna la forme de grandes lettres et il les garnit d'un engrais riche tandis que tout le reste du champ restait sans fumure. Lorsque plus tard le trèfle leva, il poussa particulièrement haut et dru sur les lignes fumées et l'on put lire distinctement de loin sur le champ en grosse écriture de trèfe ces mots : « Cet endroit a été fumé avec du plâtre ».

Les paysans, à tête dure, se laissèrent-ils convaincre par cette preuve ? notre histoire ne le dit pas. Cela ne va nullement de soi. Personne ne peut en effet être contraint par des raisons

d’ordre purement logique à reconnaître une interdépendance causale, même dans ce qui se présente à lui sous l’aspect d’une régularité absolue. Pensons seulement à l’exemple kantien du jour et de la nuit. Ceci s’accorde tout à fait avec ce que nous avons déjà, maintes fois, eu l’occasion de souligner, à savoir que le lien causal est d’ordre transcendantal et non pas logique.

On peut toujours dire que la loi de causalité est une hypothèse, c’est en vérité trop peu pour la caractériser. En tout cas, ce n’est pas, après tout, une hypothèse comme les autres, mais bien l’hypothèse capitale et fondamentale, c’est-à-dire la condition préalable de ce fait que, d’une façon générale, il n’est pas dénué de sens de forger des hypothèses. Toute hypothèse, en effet, qui formule une règle précise quelconque, prend pied déjà sur la valeur de la loi de causalité.

Il nous reste encore à considérer cette catégorie de sciences qui a pour objet les plus complexes et les plus délicats des phénomènes, ceux qui nous touchent le plus immédiatement, les phénomènes spirituels. Les énormes difficultés auxquelles se heurte l’emploi de la méthode d’observation objective dans les sciences de l’esprit et spécialement dans celle qui précède les autres, je veux dire la science de l’histoire, ne serait-ce qu’en raison du nombre limité des sources, se trouvent atténuées, dans une certaine mesure du fait que ces sciences disposent d’une méthode particulière d’ordre subjectif étrangère aux sciences naturelles, la méthode d’auto-observation qui rend le chercheur capable d’éprouver par sympathie, dans une certaine mesure, les états d’âme des

personnages ou des groupes de personnes dont il s'occupe et de s'ouvrir ainsi certaines vues sur les particularités de leurs sentiments et de leurs démarches intellectuelles.

Demandons-nous-le donc, une fois de plus, quelle position les sciences de l'esprit adoptent-elles en ce qui concerne le problème ? Existe-t-il partout, d'après elles, dans le monde de l'esprit, dans le sentiment, la volonté, l'intelligence et l'activité de l'homme, une rigueur, une interdépendance causale, de telle sorte que chaque expérience vitale, chaque pensée, chaque vouloir, soit conditionnés pleinement et nécessairement par une ou plusieurs circonstances ou survenances antérieures ; ou bien règne-t-il ici, par contraste avec la nature, jusqu'à un certain point, quelque liberté, arbitraire ou hasard, comme on voudra l'appeler ?

Dès longtemps il s'est formé là-dessus des opinions très diverses. C'est ainsi que se sont trouvées répandues jusqu'à ces tout derniers temps des théories comme à peu près la suivante : Plus haut l'on monte sur l'échelle des êtres dans la nature, plus on voit décroître en importance le rôle de la nécessité et plus grands deviennent le domaine et la portée de la liberté créatrice qui, chez l'homme, s'élève jusqu'à l'autonomie complète de la volonté.

Une telle conception est-elle juste et, si oui, jusqu'à quel point ? Il n'appartient qu'à la recherche historique de se prononcer à ce sujet. La question se pose d'ailleurs tout à fait comme dans les sciences de la nature, à cela près que l'on se sert ici d'une terminologie quelque peu différente et en

harmonie avec les circonstances spéciales en présence desquelles on se trouve. Comme objet de la recherche, nous avions dans les sciences de la nature, un être déterminé doué de propriétés données ; de même ici, nous avons une personnalité individuelle déterminée, avec des prédispositions héréditaires données, telles que la structure du corps, l'intelligence, l'imagination, le caractère et le tempérament, l'humeur. Comme conditions extérieures, nous voyons agir les conditions physiques du monde qui enveloppe l'individu, telles qu'elles s'exercent par le climat, l'alimentation, l'éducation, les relations, les lectures, etc. On se demandera si, d'après toutes ces données, on peut déterminer la conduite à venir de l'homme selon certaines lois et cela en tous ses détails.

Il va de soi qu'il ne peut s'agir ici, bien moins encore que dans les sciences naturelles, de donner à cette question une réponse totale et irréfutable en logique ; mais il n'est pas moins permis de penser, dès aujourd'hui, et en toute assurance, que la direction prise, aussi bien par la psychologie, que par la science historique dans le cours de leur développement, conduiront à résoudre la question, dans toute son étendue, par l'affirmative. Le rôle que la force joue dans la nature, comme cause des mouvements, est assumé ici, dans le monde de l'esprit, par le motif comme cause des actes ; et de même qu'à tout instant les mouvements d'un corps matériel résultent fatalement de l'action concomitante des diverses forces, en des sens déterminés, de même les actes de l'homme répondent avec la même fatalité à la résultante des motifs qui se renforcent ou se combattent les uns et les autres et produisent ainsi leurs effets

en partie d’une façon plus ou moins consciente et aussi, en partie, sans qu’il s’en aperçoive.

Quand bien même, au premier abord, maintes démarches de l’homme paraîtraient inexplicables, énigmatiques, un examen plus serré parvient cependant, en beaucoup de cas, à les reconnaître comme déterminées par des causes qui peuvent résider dans des prédispositions spéciales du caractère, dans l’humeur du moment, ou encore dans quelques particularités des circonstances extérieures ; et, quant aux autres cas, nous avons toutes les raisons d’admettre que, si l’explication est difficile, ce n’est pas que les actes en question soient sans motifs ; mais seulement que nous avons une connaissance insuffisante de l’état des choses avec tous ses détails, exactement comme dans le cas du jeu de dés, malgré l’absence apparente de règle dans la succession des coups, personne ne met en doute l’application de la loi de causalité à chaque coup distinct. Quand bien même, aussi, maintes fois, les motifs d’un acte resteraient tout à fait dans l’ombre, un acte dénué de motifs est, scientifiquement, aussi peu admissible qu’un hasard absolu dans la nature inanimée,

Nous pouvons après cela laisser entièrement de côté la difficile question de la réaction réciproque entre phénomènes physiques et phénomènes psychiques. Il suffit d’admettre le principe que tout phénomène psychique dépend, selon des lois déterminées, d’un phénomène physique correspondant.

Comme chaque acte n’est pas seulement déterminé par des motifs antérieurs qui en sont la cause, mais agit lui-même

comme cause sur des actes postérieurs, il se forme ainsi par l’entrelacement des motifs et des actes une chaîne sans fin de phénomènes successifs dans la vie de l’esprit et chaque anneau de cette chaîne est soudé au suivant tout aussi bien qu’au précédent, par une causalité rigoureuse.

Les tentatives, à vrai dire n’ont pas manqué, pour rompre l’interdépendance de ces anneaux. C’est ainsi qu’Hermann Lotze, en opposition consciente contre Kant, à présenté avec insistance cette théorie qu’une telle chaîne de causes a beau n’avoir pas de fin elle peut avoir un commencement, en d’autres termes, il arrive d’après lui, surtout dans les têtes ou repose un esprit aux facultés créatrices, que surgissent, en certains cas, des motifs qu’aucune cause extérieure ne conditionne et qui ne tiennent que d’eux-mêmes leur efficacité, de telle sorte qu’ils forment l’anneau initial d’une nouvelle chaîne de causes.

S’il pouvait réellement se produire quelque chose de tel, l’incessant travail de la recherche scientifique en ce point devrait pourtant réussir, en un cas quelconque, et ne serait-ce qu’une fois à démontrer enfin que c’est là, à tout le moins, une chose croyable. Or, jusqu’à présent, on n’a rien pu découvrir nulle part à quoi se puisse accrocher l’existence de ces prétendus commencements libres. Au contraire, plus la science a pénétré profondément et en détail dans la genèse même des grands mouvements spirituels de l’histoire mondiale, plus clairement elle a toujours mis en lumière la causalité qui les conditionne, leur dépendance des facteurs qui les précèdent et

les préparent, et l'on peut dire, précisément à ce sujet et dès aujourd'hui, que, réciproquement, la recherche scientifique a pour racine des considérations causales et que la connaissance scientifique présuppose comme condition première l'admission d'une causalité sans exception, d'un déterminisme intégral.

Il est aisé de comprendre que nous ne pouvons borner les conséquences de cette conclusion à aucune frontière déterminée et qu'il ne nous est pas permis d'hésiter à l'étendre, même aux productions les plus élevées de l'esprit humain. Nous devons ainsi avouer sans hésitation que, même l'esprit de nos plus grands maîtres, l'esprit d'un Kant, d'un Gœthe, d'un Beethoven, au moment même de ses plus hautes envolées et de ses élans spirituels les plus profonds, les plus intimes, subissait les contraintes de la causalité et n'était qu'un instrument aux mains de la toute-puissante et universelle loi.

Une pareille affirmation à l'égard de ce que notre admiration et notre respect placent au rang le plus élevé et le plus noble parmi les créations du genre humain, pourrait aisément passer pour un blasphème aussi intolérable que gratuit si, d'autre part, nous n'avions à mettre en regard pour nous, simples mortels, cette considération que nous n'allons pas bien loin sans cesser de pénétrer en ses infinies délicatesses l'interdépendance causale dont il s'agit ici ; et que la différence entre le point de vue plutôt descriptif qui nous est imposé et le point de vue réellement strictement causal doit être encore bien plus considérable que la différence existant entre les méthodes macroscopiste et microscopiste du physicien qui pourtant,

toutes les deux, présupposent la stricte application de la loi de causalité.

Mais alors, car on pourrait fort bien se poser ici la question, à quoi bon parler d'une interdépendance causale précise ? Cela a-t-il encore un sens si personne au monde n'est en état de la saisir réellement comme telle ?

C'est ici que se manifeste d'une façon particulièrement sensible la nature propre de la causalité. Oui, vraiment, ce mot a encore un sens, la causalité est en effet transcendentale et nous nous sommes amplement étendus sur ce sujet ; elle est tout à fait indépendante de la manière d'être de l'esprit qui cherche, bien plus, elle conserverait son importance, si tout sujet capable de connaître venait à faire complètement défaut. Dans le cas qui nous occupe, voici quel est le sens intelligible de l'interdépendance causale.

On peut parfaitement concevoir et peut-être n'est-il pas du tout invraisemblable que notre intellect humain ne soit pas le plus haut, mais qu'il se trouve en quelque autre lieu ou à quelque autre époque des êtres dont l'intelligence dépasse la nôtre d'aussi loin que la nôtre dépasse, par exemple, celle des infusoires. Il pourrait très bien arriver que pour les regards pénétrants d'un tel esprit capable de suivre en détail, aussi bien les plus fugitifs éclairs de pensée que les modifications les plus délicates des ganglions cérébraux de l'homme. (Émile du Bois-Reymond, dans un de ses discours bien connus, l'a nommé un jour, en mémoire du fondateur de la mécanique céleste un esprit laplacien) — ; pour cet être, les œuvres Créatrices de nos

héros de l'esprit seraient soumises à des lois tout aussi puissantes et immuables que celles qui se manifestent de nos jours aux regards de l'astronome lorsqu'il observe au télescope les mouvements multiples et divers du ciel étoilé.

Nous devons d'ailleurs, pour les phénomènes spirituels, comme pour tous les autres, distinguer entre l'application et la constatation permanente de la loi de causalité. Applicable, cette loi le demeure en toute circonstance, grâce à son caractère transcendental ; constatable en permanence, elle ne l'est que pour un esprit dont l'intelligence surpasse, dans une certaine mesure d'une grandeur peu commune, l'intelligence de l'esprit à explorer, de l'objet soumis à la recherche. Plus faible est cet écart, plus incertaine aussi et plus lacunaire devient l'étude causale et par là même l'étude scientifique. C'est de là que vient, pour nous, la difficulté, bien plus, l'impossibilité de comprendre, du point de vue de la causalité les pensées et les actes d'un génie. Même un esprit également génial est obligé, pour y parvenir, d'appeler à son aide des interprétations, des présomptions des déductions analogiques ; et, pour l'imbécile, le génie demeurera toujours un livre fermé de sept sceaux.

L'homme le plus haut placé quant à l'esprit est donc, malgré tout, lui aussi, assujetti dans toutes ses activités à la loi de causalité et l'on doit, à tout le moins en principe, compter constamment avec la possibilité de voir un jour la recherche scientifique, à force de pénétrer sans cesse plus profondément et de s'affiner toujours davantage, réussir finalement à comprendre, même la plus géniale créature humaine dans son

conditionnement causal, car la pensée scientifique exige, encore une fois, la causalité. Aussi pensée causale et pensée scientifique s’équivalent-elles, le but dernier de la science étant de mener jusqu’au bout dans toute sa plénitude la recherche des causes.

V

Et maintenant qu’en est-il de la volonté libre ? Y a-t-il place encore pour elle à côté de la causalité qui englobe tout ? Au moment où nous en venons à cette question, la dernière et la plus importante de celles que nous étudions ici, je signalerai d’abord une circonstance frappante et qui nous donnera, en tout cas, toutes sortes de choses à penser en cette occurrence.

Si l’aveugle hasard et le prodige doivent, comme nous l’avons vu tout à l’heure, être radicalement exclus de la science, elle n’en a que plus d’occasions de s’occuper de la croyance aux prodiges. Cette croyance jouit en effet depuis toujours dans l’ensemble de l’humanité de la plus large diffusion : c’est un fait notoire, et dont les manifestations se renouvellent sans cesse tout le long des siècles, sous des formes innombrables. Comme tel, il exige d’une façon pressante une explication scientifique et par conséquent causale. La croyance aux prodiges représente, comme l’on sait, dans l’histoire de la civilisation humaine une puissance véritable et d’une énorme importance. Elle a été la source d’une multitude de bénédictions, elle a inspiré de nobles âmes, les actions les plus grandes, les plus héroïques. Elle a aussi, je l’avoue, surtout

lorsqu’elle s’est tournée au fanatisme, causé des maux sans mesure, dévasté des régions entières, sacrifié d’innombrables innocents.

Selon les données que nous ont fourni jusqu’ici nos considérations, il faudrait maintenant s’attendre précisément à ce que les progrès de la connaissance scientifique et sa diffusion croissante chez tous les peuples civilisés du globe dressent peu à peu contre la croyance aux prodiges une digue de plus en plus haute et forte à mesure que le temps s’écoule ; or il n’y a trace de rien de tel, au contraire. Notre temps qui se vante si fort de faire des progrès est justement celui où la croyance aux prodiges, sous les forces les plus diverses comme l’occultisme, le spiritisme, la théosophie et mille autres variétés de quelque nom qu’on les décore, étend de plus en plus ses ravages, en dépit des tentatives opiniâtres que, du côté de la science, on a dirigées contre elle en vue de la repousser. Par contre, les efforts de la ligue moniste appelée à la vie, il y a plusieurs années, au bruit d’éclatantes fanfares, dans le but de contribuer à faire accepter partout une conception établie sur des bases purement scientifiques n’ont obtenu qu’un succès tout à fait mesquin en comparaison.

Comment expliquer ce fait singulier ? Y aurait-il, en fin de compte, au fond de la croyance aux prodiges, quelque bizarres et insoutenables formes qu’elle puisse souvent revêtir, un élément qui se justifie ? Se pourrait-il que la science n’eût pas, dans toutes les questions, le dernier mot ? Ou, pour parler plus clairement, faudrait-il, en un point quelconque, opposer aux

conceptions purement causales une barrière solide qu’elles ne puissent pas franchir ?

Ces questions nous placent juste au cœur du problème que nous discutons aujourd’hui et nous n’avons plus besoin maintenant de chercher bien loin la réponse, elle est déjà contenue dans ce qui précède.

En fait, il y a un point dans le vaste monde incommensurable de la nature et de l’esprit, un seul et unique point qui est et demeure toujours inaccessible non seulement pratiquement, mais encore logiquement, à toute considération causale ; ce point c’est notre propre moi. Un point minuscule, comme je l’ai dit dans l’étendue du monde et pourtant, un monde aussi. Oui, c’est un monde tout entier, le monde qui englobe tout l’ensemble de ce que nous voulons et pensons, le monde qui recèle à côté de la plus profonde souffrance, la plus haute béatitude ; l’unique domaine dont aucune des forces du destin ne puisse nous arracher la possession et que nous n’abandonnerons un jour qu’avec notre vie même.

Ce n’est pas que notre monde soit soustrait dans son ensemble à toute considération causale. En principe, rien absolument ne nous empêche de saisir nous-mêmes, sans cesse, n’importe laquelle de nos propres expériences vitales dans sa stricte nécessité causale. Mais, pour cela, une condition très lourde s’impose inéluctablement : il faut que depuis cette expérience nous soyons devenus énormément plus prudents ; si prudents que nous puissions nous sentir à l’égard de l’état où nous trouvions alors dans la situation d’un observateur

microscopiste et d’un esprit laplacien. Alors seulement se trouve réalisé cet éloignement, ce minimum de distance entre le sujet connaissant et l’objet à explorer que requiert inflexiblement, nous l’avons démontré plus haut en termes exprès, l’exercice complet de l’investigation causale. Plus cet éloignement est réduit, c’est-à-dire plus le moment est prématuré où nous nous mettons à considérer nos expériences antérieures, moins il nous devient possible de nous observer parfaitement nous-mêmes ; et, quand l’activité qui tend à connaître fait déjà partie elle-même de celle qui doit être étudiée, toute considération causale devient entièrement caduque et même tout à fait dénuée de sens.

Ainsi donc, s’écrieront bien des désillusionnés, notre moi n’est affranchi qu’en apparence, et grâce à notre insuffisance intellectuelle, des chaînes de la causalité ? Rien ne serait plus à contre-sens que de telles expressions. Elles seraient tout aussi injustifiées que si l’on venait dire que le plus agile des athlètes ne peut pas distancer son ombre à la course parce qu’il ne peut pas remuer les pieds assez vite. Non l’impossibilité de soumettre à la loi de causalité notre moi propre et actuel tient à quelque chose de beaucoup plus profond, elle est d’origine logique et de même nature que le principe déjà rappelé par moi que la partie ne peut jamais être plus grande que le tout. À ce principe, la plus haute intelligence, un esprit laplacien même, est soumis. Encore qu’un tel esprit puisse en effet considérer d’une manière parfaitement causale les plus géniales créations d’un cerveau humain, son art refuserait aussitôt, s’il venait à déchoir jusque-là, d’appliquer la loi de causalité à sa propre

activité intellectuelle. Je l’avoue : qu’un être placé au-dessus de nous en sagesse de toute la hauteur du ciel et capable de pénétrer du regard tous les replis de notre cerveau, tous les battements de notre cœur, reconnaisse nos pensées et nos actes comme conditionnés causalement, il faut nous y résigner ; mais il n’y a là nul abaissement du sentiment que nous avons de nous-mêmes. Acceptons de partager ce point de vue avec les croyants des religions les plus hautes. Pour autant que nous assumons nous-mêmes, par contre, le rôle de sujet connaissant, il nous faut renoncer à tout jugement purement causal de notre moi actuel. C’est donc là que le libre arbitre s’introduit et réclame sa place sans se laisser déloger par quoi que ce soit. Et nous-mêmes, nous sommes en droit de croire à des possibilités illimitées, aux forces en sommeil les plus puissantes, à n’importe quel prodige, sans avoir jamais à craindre le moindre conflit avec la loi de causalité.

Ce qui vaut d’ailleurs pour notre propre présent, a la même valeur, d’abord pour notre propre avenir aussi bien que pour les autres événements futurs soumis à des influences venant de notre moi actuel. Comme l’avenir, en effet, se relie constamment au présent, notre propre avenir ne se laisse jamais saisir d’une façon purement causale ; et, de ce côté, il est permis à chacun d’entre nous d’accorder à sa fantaisie le plus libre cours et d’escalader dans ses projets d’avenir des sommets nouveaux, insoupçonnés. À cet égard, le domaine dans lequel la loi de causalité perd son importance, mieux qu’à un point isolé se compare à une formation conique dont la

pointe plonge dans le moi actuel, tandis que le reste partant de là dans toutes les directions s'étend au loin dans l'avenir.

Il est à peine besoin d'insister sur le fait que la loi de causalité est pratiquement inutilisable, non seulement dans le cas dont nous venons de nous occuper, où c'est une question de principe, mais encore dans d'autres domaines beaucoup plus vastes. C'est ce qui apparaît surtout quand on cherche À l'appliquer à nos semblables. Il ne se trouvera, en effet, personne d'assez présomptueux pour se croire appelé à jouer vis-à-vis des autres hommes, le rôle d'un « esprit laplacien ». D'autre part cependant, nous sommes poussés, pour pouvoir entrer en relation avec nos semblables, à interpréter leur conduite d'un point de vue causal afin de pouvoir comprendre les motifs de leurs actes et de les influencer dans tel cas donné, selon nos désirs. Cela nous sera d'autant plus facile que leur intelligence sera moins développée et moins affinée que la nôtre. Inversement, il peut tout aussi aisément arriver, comme chacun de nous en a fait l'expérience dans son jeune âge, que, devant une personnalité supérieure, nous ayons l'impression d'un regard pénétrant en nous mieux que le nôtre en elle. Un sentiment d'insécurité nous saisit alors ; il nous faut mettre en garde contre des surprises et il en résulte suivant les circonstances, un sentiment d'anxiété méfiante ou un abandon plein de respect.

VI

Jusqu'ici, nous n'avons réglé notre conduite que d'après une façon purement scientifique d'envisager les choses ; mais voici qu'elle commence à nous laisser en plan. Nous voyons clairement, en effet, que la loi de causalité ne peut pas nous servir de guide dans le sentier de notre propre vie, parce que, logiquement parlant, il est impossible que nous arrivions jamais, par des réflexions d'ordre causal, à prévoir les motifs de nos actes futurs.

L'homme cependant a besoin de principes pour organiser ses actions et ses abstentions ; il en a besoin d'une façon beaucoup plus pressante encore que de la connaissance scientifique. Une seule action a souvent pour lui beaucoup plus d'importance que toutes les sciences du monde ensemble. Le voilà donc forcé de se pourvoir ici d'une autre direction et il ne la trouve qu'en introduisant, au lieu de la loi de causalité, la loi morale, le devoir de conscience, l'impératif catégorique. La nécessité morale — « Je suis obligé » — prend alors la place de la nécessité causale — « Je suis contraint » —. Le caractère prend la place de l'intelligence, la foi religieuse prend la place de la connaissance scientifique. Ici, la vue devient libre ; à l'homme qui pense et qui s'efforce, de vastes espaces et de brûlantes questions s'ouvrent en foule.

Il n'est pourtant pas de mon sujet, ni selon mes forces, de faire ici quelque tentative pour entreprendre une étude approfondie de l'essence de la religion sous ses diverses formes. Il me suffit de relever maintenant qu'aucune religion n'est incompatible

avec un point de vue strictement scientifique, pourvu et pour autant qu'elle n'entre en contradiction, ni avec elle-même, ni avec la loi du conditionnement causal de tous les faits extérieurs.

Il faut donc rejeter, à mon avis, comme scientifiquement sans valeur, toute religion qui nie la valeur de la vie. Renier la vie, en effet, c'est, du même coup, renier la pensée et renier la pensée implique le reniement de toute religion. Une telle religion, alors aboutit logiquement à la négation de sa propre valeur. Qui ne veut accepter cette simple conclusion doit tenir pour possible, ou bien la pensée sans la vie, ou bien la religion sans la pensée. Deux conceptions qui me semblent trop étranges, pour que je m'y arrête plus longtemps.

L'idée que, même dans notre activité morale, nous sommes soumis à des lois causales déterminées, que nous ne pouvons à vrai dire pas reconnaître sur-le-champ, n'est pas seulement d'importance pour la connaissance scientifique, elle peut aussi nous rendre de précieux services dans la vie pratique lorsque nous nous efforçons de saisir tant bien que mal et après coup d'un point de vue causal des actes que nous avons accomplis, particulièrement quand ces actes viennent à nous faire du mal par la suite, à cause des conséquences nuisibles qu'ils ont engendrées contre notre attente et contre nos intentions. Il est, certes, périlleux, à certains égards, de se plonger dans des considérations trop profondes sur des événements regrettables, mais déjà passés et que l'on ne peut modifier en rien. Mais il se peut toutefois, d'autre part, que ce soit pour nous un allègement

réel et qui contribue à l'adoucissement de notre chagrin de voir clairement après coup que dans les circonstances d'alors, étant donné notre état d'âme, il ne pouvait y avoir aucun motif déterminant en dehors de ceux-là mêmes qui ont déterminé notre conduite. Que si cela ne change rien aux suites regrettables de nos actes, en fait nous resterons tout de même plus tranquilles devant le cours entier des choses et nous nous épargnerons notamment l'amertume et le remords, dont bien des hommes en pareil cas se tourmentent toute leur vie.

De longtemps encore, cela ne nous rendra pas fatalistes. Il y a, sans doute, pour les esprits superficiels, un sophisme séduisant pour sa commodité ; mais d'autant plus dangereux pour la vie pratique, un courant de pensée qui, sous le couvert d'une application sans limites de la loi de causalité, tend à affaiblir ou même à nier tout à fait le concept de la responsabilité morale ; la plus puissante sauvegarde contre de tels égarements moraux sera toujours pour chacun la voix de sa propre conscience. Celui-là même, d'ailleurs, qui ne voit, par nature, qu'un côté des choses ou qui s'est trop généreusement livré à des théories sociales insuffisamment muries et qui a subi d'une façon ou d'une autre quelque trouble dans son impartialité jusqu'à mettre de côté la raison naturelle, devrait, à tout le moins, raisonnablement comprendre que la loi de causalité, dès lors qu'elle ne parvient pas à nous servir de fil conducteur pour nos actes intentionnels et n'a même en principe aucun sens pour nous, comme nous l'avons vu, si l'on essaie de l'appliquer à nos propres états d'âme dans le moment présent, ne peut

aucunement nous dégager de notre propre responsabilité morale pour les actes que nous sommes en train d'accomplir.

C'est seulement lorsque un acte est posé et se trouve définitivement, exclusivement, derrière nous, que nous avons le droit d'essayer de le comprendre d'un point de vue purement causal et que nous pouvons souvent obtenir une certaine connaissance de ses origines causales. Les vues que nous acquerrons alors nous seront nécessaires pour éviter, dans les cas semblables qui se présenteront à l'avenir, les fautes que nous avons faites et pour n'en pas commettre de nouvelles ! « Celui qui toujours aspire et s'efforce, c'est lui que nous pouvons sauver. » Nous avons déjà eu plusieurs fois l'occasion de relever expressément que, en soi, la loi de causalité ne pose aucune espèce de borne à l'optimisme, fût-ce le plus hardi, dans notre foi à nous-mêmes et à notre propre avenir.

Il nous faut pourtant ici ajouter encore quelque chose. Lorsque, regardant en arrière vers un événement qui nous fait une impression désagréable, nous tâchons honnêtement de nous rendre compte clairement et en détail de toutes ses suites ultérieures, il se peut que nous soyons amenés à découvrir que tel événement, dont nous nous sommes plaint d'abord comme d'un malheur, a tourné en réalité, par ses conséquences, à notre avantage, soit qu'il apparaisse seulement comme un gain fait en vue d'un but plus élevé, soit qu'il nous ait préservé de quelque malheur plus grand encore. Peut-être alors nos regrets se changeront-ils alors en satisfaction. C'est là qu'il faut chercher le sens profond de ce dicton populaire : « Qui sait à

quoi cela est bon ? » De même nous ne pouvons jamais savoir si des suites aussi heureuses d’actes passés ne se manifesteront pas à nous seulement dans l’avenir. Oui, en principe, rien ne nous empêche d’admettre qu’elles se produiront tôt ou tard dans tous les cas, bien que nous n’en ayons pas chaque fois connaissance. Aucune science, aucune logique, ne peut repousser une telle conception et elle ne saurait être mieux exprimée que par cette parole de saint Paul : « Pour ceux qui aiment Dieu, toutes choses tournent nécessairement au mieux. » Quiconque parvient à s’élever à cette façon d’envisager la vie, en vérité doit être tenu pour heureux. De même qu’il reste en effet constamment ouvert à tout ce qui est bon et beau et qu’il peut rencontrer à toute heure chaque jour, de même il est en droit de se considérer comme invulnérable désormais à tous les maux qui peuvent l’atteindre en cette vie toujours changeante.

Ainsi, la science, à la conduite de laquelle nous nous étions confiés, nous a enfin menés jusqu’à la limite de sa capacité de servir ; mais, justement, dès lors qu’elle nous montre elle-même cette limite et la reconnaît, elle est, par là même, en droit d’exiger, de son côté, que l’on reconnaisse et que l’on respecte les domaines sur lesquels, elle seule, est faite pour régner. Science et religion ne forment pas, en vérité, une antithèse, mais elles ont besoin de se compléter l’une l’autre en tout homme qui réfléchit sérieusement. Ce n’est certainement pas par hasard que les plus grands génies de tous les temps furent aussi profondément religieux par nature, encore qu’ils n’aient pas aimé à donner en spectacle leur Saint des Saints. C’est

seulement par le travail simultané des forces de la raison et des forces de la volonté que la philosophie produit son fruit le plus mûr, le plus délicieux : « la morale ». Car la science elle-même met au jour des valeurs morales ; avant tout, elle nous enseigne la véracité et le respect. Véracité dans la perpétuelle poussée du progrès vers une connaissance toujours plus exacte du monde qui nous entoure et du monde de l'esprit ; respect devant le regard méditatif longuement fixé sur le mystère éternellement insondable, le divin mystère que recèle notre propre cœur.

CHAPITRE VI

DU RELATIF À L’ABSOLU

S’il m’arrive de jeter un regard sur l’état où la science se trouvait quand je m’orientais définitivement vers elle, je puis mesurer la distance énorme qui a été franchie depuis lors. Un demi-siècle a suffi pour changer de fond en comble le visage de la physique. Au début de mes études dans cette science, j’étais en quête d’éclaircissements sur les conditions de mes futures études et sur les perspectives qui pouvaient s’ouvrir à moi et j’allai prendre conseil auprès de mon vénéré maître Philipp von Jolly. Ce dernier me donna la physique pour une science déjà parvenue à un haut degré de développement et presque arrivée à complète maturité. Le principe de la conservation de l’énergie en ayant été en quelque sorte le couronnement, la physique ne pouvait tarder à recevoir sa forme définitive. Il y avait bien, çà et là, quelques petits coins où tout n’était pas parfaitement en ordre ; mais, pris dans son ensemble, le système devait être tenu pour suffisamment assuré, de telle sorte que la physique se rapprochait très sensiblement de l’état de perfection où la géométrie était déjà parvenue depuis des siècles.

Telle était l’opinion d’un physicien éminent, il y a une cinquantaine d’années. Certes, il ne manquait pas alors de points ayant besoin d’être élucidés et leur existence n’était pas

sans troubler quelque peu l’impression d’agréable quiétude procurée par l’ensemble. C’est ainsi que le comportement de l’éther lumineux résistait opiniâtrement à toutes les tentatives d’explication. De même, les rayons cathodiques, découverts à la même époque par Wilhelm Hittorf, posaient nombre d’énigmes aux théoriciens. Heinrich Hertz, la dernière étoile au ciel de la physique classique ramenait les rayons cathodiques à des ondes longitudinales de l’éther ; parce que, avec les moyens dont il disposait, il ne pouvait pas réussir à mettre en évidence leur action sur une aiguille aimantée et cependant il se disait avec raison que cette action devait exister puisque les rayons cathodiques transportaient un courant électrique.

Une nouvelle ère pour la physique commence avec la découverte des électrons, des rayons X et de la radioactivité ; nous vivons encore sous l’influence de ces découvertes et nous ne pouvons pas prévoir jusqu’où s’étendra leur retentissement : en tout cas, il est probable qu’il se prolongera encore pendant une longue période de temps.

En abordant aujourd’hui les hautes régions de la physique théorique, je dois m’expliquer tout d’abord sur la forme quelque peu abstraite que j’ai donnée à mon sujet, sur les intentions qui ont présidé à mon choix, et sur le point de vue je me propose d’adopter. Pourtant je n’ai pas l’intention d’approfondir la signification des mots relatif et absolu. D’une part, en effet, je suis convaincu que les explications même les plus détaillées sont toujours, sur quelque point, incomplètes et

même inexactes et, d’autre part, surtout je n’attache pas tant d’importance au mot qu’à la chose. Je n’hésiterai même pas à apporter aux termes usuels un changement, quel qu’il soit, pourvu qu’il entraîne une amélioration à l’expression des faits. Je ne me placerai donc à aucun point de vue spécial, et je n’obéirai à aucun dessein préconçu. Je me bornerai simplement à faire ressortir quelques faits particulièrement significatifs de l’évolution de la physique, telle qu’elle a eu lieu au siècle dernier. Je m’efforcerai d’en mettre en relief les traits communs et d’indiquer ce qu’ils ont de caractéristique. J’éviterai même les préambules généraux pour laisser tes faits parler eux-mêmes et l’impression générale que nous en recevrons sera l’unique règle de notre jugement.

Je commencerai par une des notions les plus élémentaires de la chimie : la notion de poids atomique. La mesure des poids atomiques ne date que de la découverte de la loi fondamentale de la stœchiométrie, d’après laquelle tous les corps se combinent dans des rapports de poids bien déterminés. Un gramme d’hydrogène, par exemple, se combine toujours avec 8 grammes d’oxygène pour former de l’eau, avec 35 gr. 5 de chlore pour former de l’acide chlorhydrique. 8 est donc le poids équivalent de l’oxygène et 35,5 celui du chlore, et l’on peut trouver de la même façon l’équivalent de tout élément chimique en se basant sur n’importe lequel des composés qu’il peut donner avec un autre élément. Naturellement, ces nombres n’ont de sens qu’à la condition de prendre l’hydrogène comme unité ; ils comportent donc un certain arbitraire. Mais il y a plus : leur signification se restreint au composé spécial qui a

servi à les calculer. Ainsi l’équivalent 8 pour l’oxygène n’est exact que si on le rapporte à l’eau, si on le calcule à partir de l’eau oxygénée on trouve 16 et il n’y a aucune raison de choisir un de ces corps plutôt que l’autre. Tout corps simple possède donc en règle générale plusieurs équivalents chimiques. En principe, on peut même dire qu’il possède autant d’équivalents qu’il peut donner de combinaisons d’espèces différentes. Si on ne connaît aucune combinaison d’un élément, on ne possède donc aucun moyen permettant de lui attribuer un équivalent chimique.

Mais il y a un fait important, c’est que les combinaisons d’un même élément avec les autres éléments donnent toujours le même nombre pour équivalent ou des multiples exacts de ce nombre. L’équivalent 35,5 pour le chlore n’est pas seulement la quantité de ce corps qui se combine avec un gramme d’hydrogène, c’est aussi le poids qui se combine au poids équivalent, à savoir 8 grammes d’oxygène pour donner de l’oxyde de chlore. Si l’on ne veut pas voir dans cette coïncidence un hasard incompréhensible, l’idée vient naturellement à l’esprit de considérer l’équivalent d’un élément comme quelque chose qui présente un certain caractère de fixité, permettant de l’envisager en faisant abstraction des combinaisons dans lesquelles ce corps peut entrer ; et c’est là, à un certain point de vue, en faire un absolu. L’histoire de la chimie nous montre que cette généralisation de la notion d’équivalent fut accomplie de bonne heure, il y eut cependant une difficulté qui fut ressentie pendant longtemps comme particulièrement gênante. Cette difficulté provient de ce que les

deux éléments peuvent souvent donner plusieurs combinaisons différentes. Tel est le cas, par exemple, de l'oxygène et de l'hydrogène ; et on ne peut savoir finalement si l'équivalent de l'oxygène est 8 ou bien 16. Pour pouvoir trancher la question, il fallait faire appel à un nouvel axiome, étranger cette fois à la stœchiométrie. L'hypothèse d'Avogadro fut justement l'axiome cherché. Cette hypothèse se base sur le fait suivant, découvert par Gay-Lussac : deux éléments à l'état gazeux ne se combinent pas seulement suivant des rapports pondéraux déterminés ; mais aussi suivant des rapports volumétriques fixes, si on les prend à la même température et sous la même pression. Il en résulte que, dans la série des poids équivalents que l'on peut déduire de la série des composés issus de ces deux éléments, il y en a un, désigné sous le nom de poids moléculaire, qui est tel que le rapport des poids moléculaires de deux gaz est égal à celui de leurs densités. Cette définition ne fait plus appel au concept de réaction chimique, mais, plus simplement, à celui de corps chimiquement définis. On peut donc l'appliquer à des éléments qui, comme les gaz nobles, ne peuvent entrer en combinaison avec aucun autre.

En appliquant la loi d'Avogadro pour déterminer les poids moléculaires, on s'aperçoit que, fréquemment, les molécules d'un élément n'entrent dans un composé que pour une fraction de leur poids moléculaire. Ainsi la molécule de vapeur d'eau se compose d'une molécule entière d'hydrogène et d'une demi-molécule d'oxygène. La molécule de gaz chlorhydrique se compose d'une demi-molécule de chlore et d'une demi-molécule d'hydrogène. Aussi est-on passé de l'idée de poids

moléculaire à celle de poids atomique, en définissant ce dernier comme la plus petite fraction du poids moléculaire qui se rencontre dans les combinaisons où rentre un élément. Le poids atomique déduit de la loi d'Avogadro a donc acquis à certains égards un caractère absolu, ce qui n'empêche pas que, à beaucoup d'autres points de vue, il conserve un aspect relatif. Le poids atomique selon Avogadro n'est, en effet, qu'un nombre exprimant un rapport ; pour le déterminer, il est nécessaire de poser comme égal à l'unité le poids atomique d'un certain élément, en l'espèce : l'hydrogène. (On peut aussi poser arbitrairement le poids atomique de l'oxygène comme égal à 16.) Dans tous les cas, une convention est nécessaire, faute de quoi les nombres donnés n'auraient aucun sens. C'est pourquoi les savants se sont efforcés de libérer le concept de poids atomique de cette dernière limitation et d'en faire un absolu dans un sens encore plus strict. La solution de ce problème, il est vrai, n'intéressait que peu les chimistes, car dans la chimie proprement dite, il n'est jamais question que de rapports pondéraux.

Dans toute science, il y a des conflits qui éclatent périodiquement entre les savants qui s'efforcent de mettre en ordre les axiomes existants, de les analyser et de les libérer de tout élément adventice ou accidentel (je les désignerai par la suite sous le nom de « puristes ») et ceux qui s'efforcent d'élargir les axiomes par l'introduction d'idées nouvelles. Cette dernière catégorie de chercheurs se plaît à lancer des antennes exploratrices dans les directions les plus diverses, pour tâcher de découvrir celles ou le progrès est possible. Or, en chimie, les

puristes n'ont pas fait défaut plus qu'ailleurs et, naturellement, ils ont condamné expressément toute tentative pour faire du poids atomique autre chose qu'un rapport. Mais les esprits les plus éminents du monde chimique persistaient néanmoins à trouver au moins utile de considérer, à l'instar des mécanistes, les atomes comme des édifices matériels naturels de très petite taille et autonomes. Ces atomes devaient occuper dans la molécule des situations spatiales bien définies, les modifications chimiques consistant dans la séparation des atomes en vue de leur regroupement dans des formations nouvelles.

Ceci me rappelle un souvenir du temps où j'étais étudiant à Munich. J'ai encore présent à la mémoire l'impression profonde que fit sur nous autres, étudiants du laboratoire de chimie, la polémique engagée par le leader des puristes d'alors, Hermann Kolbe, à propos des premières formules de constitution qui s'élaboraient à cette époque. Kolbe foudroyait de ses anathèmes toutes les interprétations du détail des structures moléculaires basées sur des idées atomistico-mécanistes. Ses efforts n'eurent d'ailleurs que peu de succès ; mais, moins il était écouté, plus il criait fort. Devant la violence d'attaques qui n'épargnaient personne, Adolphe von Baeyer fit ce qui convenait dans de telles circonstances ; il se tut et continua de travailler jusqu'à ce que le succès lui donnât raison. Aujourd'hui nous revoyons un état de choses semblable à propos du modèle de l'atome de Niels Bohr qui, à vrai dire, exige de la part des théoriciens une dose de bonne volonté bien

plus grande que n'en demandaient les hypothèses de la chimie structurale.

Mais, c'est au point de vue philosophique que les puristes se placèrent pour s'opposer obstinément pendant des dizaines d'années aux progrès de la théorie atomique. Ici il convient de nommer avant tout autre Ernest Mach qui, inlassablement et durant toute sa vie, ne cessa pas de déployer toutes les ressources de son analyse conceptuelle et aussi de son ironie mordante, pour jeter le discrédit sur les opinions naïves et grossières qui, selon lui, étaient celles des atomistes. Ces opinions, pensait-il, étaient singulièrement en opposition avec le progrès philosophique, par ailleurs évident, de la physique moderne.

Contre ces attaques, les partisans de la théorie atomique, au premier rang desquels figurait Ludwig Boltzmann, se trouvaient dans une situation difficile ; car, par des moyens logiques, on ne peut rien contre les puristes, tout simplement parce que ceux-ci admettent tout ce qui découle des axiomes par voie de conséquence logique : ce qu'ils rejettent c'est l'intrusion d'axiomes étrangers et nouveaux, surtout si ces derniers ne sont pas condensés en formules définitives et d'une application générale. Malheureusement, il n'est pas un seul axiome qui ait vu le jour sous une forme bien définie et qui soit sorti en cet état du cerveau de son inventeur, telle Pallas Athéné sortant toute armée de la tête de Jupiter. L'axiome ne possède tout d'abord qu'une vie plus ou moins incomplète, il flotte plus ou moins confusément dans l'imagination créatrice de son

inventeur et, souvent, ce n'est qu'après un travail pénible qu'il naît officiellement en prenant une forme scientifique utilisable. De plus, une fois même qu'il a conquis le droit de cité, il s'en faut de beaucoup que le puriste s'avoue vaincu. La question de savoir si un axiome remportera définitivement la victoire est, en effet, de celle qui ne peuvent pas être résolues par la logique. Tout ce qu'on peut dire c'est que certaines séquences régulières, empiriques, ne peuvent être comprises sans l'axiome. Mais le puriste pourra toujours déclarer que ces séquences sont purement fortuites et sur cette position il sera toujours inattaquable. Il est vrai que le dynamisme de l'effort scientifique se soucie peu de l'en déloger et qu'il continue sa marche en avant. C'est un fait qu'il en a toujours été ainsi et il y a bien des chances qu'il en soit encore fréquemment de même.

Pour en revenir à la question des poids atomiques, des correspondances empiriques furent découvertes peu à peu en si grande abondance que la question de leur valeur absolue fut très vite tranchée dans le sens affirmatif. Je me bornerai à rappeler ici le développement de la théorie cinétique des gaz et des liquides, les lois des rayonnements thermiques et lumineux, la découverte des rayons cathodiques et de la radioactivité et la mesure du quantum élémentaire d'électricité. Par toutes ces voies, on est conduit à attribuer la même valeur au poids atomique. C'est pourquoi aujourd'hui l'affirmation que le poids d'un atome d'hydrogène est égal à 1,65 quadrillionième de gramme ne soulève-t-elle plus d'objections de la part d'aucun physicien. Ce nombre est indépendant de la valeur des

poids atomiques des autres éléments : en ce sens on peut donc le regarder comme un absolu.

Si je rappelle ainsi des choses bien connues, c'est seulement en vue d'attirer l'attention sur un phénomène caractéristique présenté par l'évolution des sciences et que l'on voit se reproduire à propos de questions très différentes. Dans tous les domaines de la science, on rencontre en effet des axiomes et, dans tous les domaines aussi il y a des puristes qui s'opposent de toutes leurs forces à tout élargissement de ces axiomes qui ne soit pas un développement strictement logique. En parlant de ces autres cas, je serai finalement amené à aborder des questions qui ne seront pas aussi claires que celle que je viens de traiter. Parmi ces dernières il y en a même qui sont encore aujourd'hui des sujets de discussions très vives.

Je m'arrêterai tout d'abord à la notion d'énergie. Le principe de la conservation de l'énergie est sorti du principe mécanique des forces vives. Ce principe affirme que dans tout processus mécanique, l'accroissement de la force vive d'un corps en mouvement est égal à la diminution du potentiel des forces agissant sur ce corps. Le changement d'une des énergies : l'énergie cinétique, est donc exactement compensé par un changement égal et de sens contraire de l'autre énergie : l'énergie potentielle. Dans ce cas aussi, les puristes sont fondés à dire : dès lors que dans la formulation du principe de la conservation de l'énergie, il ne peut être question que de différences d'énergie, c'est que la notion d'énergie n'a pas de rapport avec un état, mais seulement avec un changement

d’état ; la valeur de l’énergie devra donc toujours comporter une constante indéterminée. À cette constante on ne saurait assigner aucun sens physique. Tout se passe ici comme dans la construction d’une maison ; pour l’architecte, la hauteur des différents étages au-dessus du niveau de la mer n’a pratiquement aucun sens, car il ne s’agit, en définitive que de différences de niveau.

Il n’y aurait rien à objecter à cette manière de voir, si le principe de la conservation de l’énergie était le seul principe de la physique. Comme il n’en est pas ainsi, on ne peut refuser *a priori* d’examiner la question de savoir s’il ne conviendrait pas de donner un sens absolu à la notion d’énergie par l’introduction d’un nouvel axiome, de telle sorte que cette grandeur soit déterminée complètement par l’état actuel du système. Il saute aux yeux que la notion d’énergie ainsi que les applications du principe de sa conservation en seraient grandement simplifiés. En fait, c’est là un pas qui a été franchi complètement à l’heure actuelle. À tout état donné d’un système physique, nous pouvons donc faire correspondre une valeur bien déterminée de son énergie, sans constante additive.

Considérons d’abord l’énergie du champ électromagnétique dans le vide absolu. Il y a un axiome en vertu duquel l’énergie d’un champ électromagnétique neutre est posée égale à zéro. En s’appuyant sur cet axiome on peut donc trouver la valeur absolue de l’énergie. Ce nouvel axiome n’est nullement évident et il ne peut être déduit du principe de la conservation de l’énergie. Il y a quelques années, Nernst à émis l’hypothèse

que, dans le champ d'énergie neutre, il y a une sorte d'énergie de rayonnement stationnaire qui est extrêmement grande et qui ne peut se manifester ; car elle imprègne uniformément tous les corps. Bien qu'une telle manifestation puisse se produire dans quelques cas exceptionnels, il en est d'elle comme de la pression atmosphérique qui, malgré sa valeur considérable, ne joue aucun rôle dans la plupart des mouvements que nous observons ; car elle est uniforme dans toutes les directions. Cette hypothèse au sujet du rayonnement est évidemment légitime ; mais, seul, le développement de ses conséquences peut nous renseigner sur sa valeur. Or une des plus étranges est certainement celle-ci : Il y a un système de référence qui devrait être regardé comme étant en repos absolu, à savoir celui dans lequel le rayonnement au point neutre est égal dans toutes les directions. L'énergie du champ neutre étant ainsi déterminée, celle de tout autre champ l'est par voie de conséquence.

Venons-en maintenant à l'énergie de la matière ; nous pouvons également parvenir à en déterminer la valeur absolue. Mais l'énergie d'un corps au repos n'est pas nulle, comme on pourrait le conjecturer, elle est égale au produit de la masse du corps par le carré de la vitesse de la lumière.

Cette énergie, dite énergie de repos, est une fonction de la constitution chimique du corps et de sa température. Si le corps vient à se mouvoir sous l'action d'une force, son énergie de repos, quelque grande que soit son expression numérique, n'intervient pas dans les effets du mouvement ; car il s'agit,

encore cette fois, de différences d’énergie. J’ai déjà insisté plus haut sur le fait que ces considérations ne dérivent point du principe de la conservation de l’énergie et, de fait, c’est dans le principe de la relativité restreinte qu’il faut en chercher l’origine. Il est évidemment fort curieux de voir qu’une théorie de la relativité ait eu justement pour effet de permettre la détermination de la valeur absolue de l’énergie d’un système physique. Cependant, il n’y a là qu’un paradoxe apparent. Il s’explique très facilement parce que dans la théorie de la relativité, il s’agit de l’influence du système de référence choisi ; alors qu’ici, c’est de l’influence de l’état physique d’un système sur son énergie qu’il est question.

Mais, diront les puristes, y a-t-il vraiment un sens raisonnable à dire que l’énergie d’un atome d’oxygène est 16 fois plus grande que celle d’un atome d’hydrogène ? Et ils auraient raison, s’il était insensé de parler de la transformation de l’oxygène en hydrogène. En tout cas, il est toujours hasardeux de tenir, de prime abord, quelque chose pour insensé, tant que cela ne contredit aucune loi de la logique. Il est, certes, plus sage de demeurer dans l’expectative, car un temps peut venir où une transformation, du genre de celle dont nous venons de parler, rentrera dans le domaine des choses que l’on peut raisonnablement envisager. En fait, dès aujourd’hui, on peut soupçonner que ce temps n’est pas éloigné.

Dans toutes les branches de la physique, il en est comme dans le cas de l’énergie cinétique et de l’énergie électromagnétique. Partout, comme en électrodynamique, on a été amené à passer

de la considération des différences d'énergie, qui peuvent être mesurées directement à celle de la valeur absolue de ces mêmes énergies et toujours ce changement de point de vue a eu la valeur d'un progrès. Dans la théorie de la chaleur rayonnante, par exemple, à parler strictement, on n'a affaire qu'à la différence des rayonnements émis et absorbés ; car un corps qui émet des rayons calorifiques en absorbe aussi. Mais, d'après la théorie de Prévost, on sépare ces deux grandeurs et on accorde à chacune d'elles une signification indépendante. Dans la théorie du courant galvanique, on ne mesure que des différences de potentiel, cependant on parle de la valeur absolue des potentiels et l'on pose comme nul le potentiel de toutes les charges électriques situées à une distance infinie. Dans le cas de l'émission du rayonnement monochromatique d'un atome, la mesure de la fréquence de la radiation émise ne donne toujours que la différence de l'énergie atomique avant et après l'émission. C'est seulement après avoir séparé les deux termes de cette différence que Niels Bohr, pour le spectre visible, et Arnold Sommerfeld, pour les rayons de Roentgen, sont arrivés à trouver le point d'appui nécessaire pour élucider les énigmes qui se posaient à ce sujet. Ainsi donc partout et toujours, l'énergie d'un système dans un état donné à acquis un sens absolu, indépendant du rapport de cet état avec les autres états.

Cette tendance qui consiste à passer de la différence à chacun des termes qui la compose, ou, ce qui revient au même, à passer de la différentielle à l'intégrale, n'est pas spéciale à l'énergie ; on la retrouve à propos de nombreuses autres

grandeurs physiques. Dans la théorie de l'élasticité, par exemple, les forces de volume sont ramenées à des forces de surface ; en électrodynamique, les forces pondéromotrices sont ramenées à ce qu'on nomme les tensions de Maxwell ; en thermodynamique, les grandeurs de la pression et de la température sont ramenées aux potentiels thermodynamiques. Dans tous ces cas, il s'agit d'un processus d'intégration grâce auquel on passe à des grandeurs d'un ordre supérieur. Or le problème de la détermination de la valeur absolue de ces grandeurs se confond avec celui de la détermination des constantes d'intégration et ceci nécessite un calcul séparé.

Il y a cependant, un cas particulier où je m'arrêterai un peu plus, parce qu'on ne peut encore le considérer comme complètement tranché à l'heure actuelle : c'est celui de la valeur absolue de l'entropie. Selon la définition primitive de Clausius, pour pouvoir mesurer l'entropie d'un corps quelconque, il faut qu'un cycle réversible soit parcouru ; et ce qui est calculé au moyen de ce cycle, c'est la différence des entropies à l'état final et à l'état initial. En conséquence la notion d'entropie ne se rapporte pas, normalement, à un état, mais à un changement d'état. Tout se passe donc ici exactement comme dans le cas de l'énergie et du poids atomique, avec cette restriction toutefois que dans le cas de l'entropie on n'envisage que des transformations réversibles. Il n'en est pas moins vrai que, très vite, la notion d'entropie fut généralisée, de façon à en faire une propriété caractéristique d'un état à un instant donné. Toutefois l'entropie n'était connue qu'à une

constante près, puisqu’on ne pouvait toujours mesurer que des différences d’entropie.

Même en ramenant la notion d’entropie à la statistique des oscillations éprouvées dans le temps par un système physique autour de son état d’équilibre thermodynamique, on ne parvient jamais qu’à la différence de deux entropies et jamais à sa valeur absolue.

N’y aurait-il donc aucun moyen d’attribuer une valeur absolue à l’entropie ? Qu’on ne me prête pas, d’ailleurs, pour autant, l’idée de répondre affirmativement, pour une simple raison d’analogie. Il faut nettement donner raison aux puristes quand ils disent qu’il est absurde de vouloir déduire de la seule valeur d’une différence, celle de chacune des termes à partir desquels elle est obtenue. En ce qui concerne la clarté des concepts eux-mêmes, il importe au plus haut point de savoir, dans tous les cas, ce qui peut ou non être déduit d’une définition. À ce point de vue, la critique des puristes est indispensable ; ce sont les gardiens consciencieux de l’ordre et de la netteté dans les concepts ; ordre aujourd’hui plus indispensable que jamais. Mais la physique n’est pas une science déductive et le nombre de ses axiomes n’est pas immuable. Si un nouvel axiome se présente, il ne faut pas lui refuser le droit de cité simplement parce qu’il est étranger. Ce qu’il faut donc avant tout c’est contrôler nos idées initiales et examiner les conséquences qui en découlent.

Dans le cas présent, il n’est pas difficile de mettre en évidence l’idée sous-jacente à l’hypothèse d’une valeur absolue pour

l’entropie. Considérons, à l’instar de Boltzmann, l’entropie comme étant une mesure de la probabilité thermodynamique. L’entropie d’un système en équilibre thermodynamique, doué de nombreux degrés de liberté, système dont l’énergie est déterminée, ne sera pas autre chose que le nombre des états différents que ce système peut prendre dans des conditions données. Et, si l’entropie possède une valeur absolue, cela ne veut pas dire autre chose que ceci : le nombre des états permis à ce système dans les conditions susdites est un nombre bien déterminé. Du temps de Clausius, Helmholtz, Boltzmann, une telle affirmation aurait été regardée tout de suite comme insoutenable. Tant qu’on regarde, en effet, les équations différentielles de la dynamique classique comme l’unique fondement de la physique, on doit, inévitablement, considérer tout changement comme s’effectuant d’une façon continue ; c’est pourquoi le nombre des états passibles dans des conditions externes données, sera nécessairement regardé comme infiniment grand. Mais depuis l’introduction de l’hypothèse des quanta, il en est tout autrement, et, à mon avis, d’ici peu de temps on pourra parler d’une manière tout à fait précise d’un nombre discret d’états possibles et par là même d’une valeur absolue de l’entropie, sans encourir la contradiction des physiciens les plus en vue.

En fait, le nouvel axiome des quanta est en état de produire un faisceau de conséquences heureuses, lui permettant de rivaliser avec les théories les mieux établies. Dans la théorie de la chaleur rayonnante, il a conduit à l’établissement de la loi de répartition de l’énergie dans le spectre normal ; en

thermodynamique il se traduit par le théorème de Nernst qu'il complète d'ailleurs, en ce sens qu'il permet, non seulement de prévoir l'existence, mais encore de calculer la grandeur numérique des constantes chimiques. En ce qui concerne les questions de structure atomique, le même axiome a été le point de départ des idées de Niels Bohr dans l'établissement de sa théorie des trajectoires stationnaires des électrons. C'est donc lui qui a permis d'élucider les phénomènes spectroscopiques. Devant les généralisations de plus en plus grandes dont il est la source, on peut prévoir, sauf illusion toujours possible, une évolution de la physique future que l'on pourrait caractériser en un certain sens comme en étant l'arithmétisation. Il arrive, en effet que nombre de grandeurs physiques qui étaient considérées, jusqu'ici, comme continues se révèlent au contraire comme étant discontinues et résolubles en séries dénombrables, quand on les soumet à une analyse plus serrée. Un résultat bien remarquable et tout à fait dans la ligne de cette évolution a été obtenu, grâce aux études sur les rapports d'intensité des composantes des multiplets spectraux ; études entreprises à l'Institut de Physique d'Utrecht sous la direction de L. Ornstein. Les rapports d'intensités pourraient être exprimés par des nombres entiers simples. Nous citerons aussi la tentative toute récente de Max Born en vue de transformer les équations différentielles de la mécanique classique en équations aux différences finies.

Ces quelques considérations tirées de différents cantons de la physique nous ont fait voir qu'on peut en faire ressortir un trait commun. On pourrait le caractériser en disant que certaines

grandeurs physiques auxquelles, primitivement, on ne pouvait attribuer qu'une valeur relative en raison de l'idée que l'on s'en faisait, ont acquis une valeur absolue en vertu d'une évolution ultérieure. Est-ce là un trait qui caractérise d'une manière générale l'évolution de toute idée scientifique ? Il serait certes prématuré de l'affirmer catégoriquement.

Je me figure un adversaire de cette opinion prenant ici le contre-pied de tout ce que je viens d'écrire, et intitulant son exposé : De l'absolu au relatif. Il ne serait pas embarrassé pour trouver des faits en grande abondance à l'appui de son point de vue. Je le vois même débuter comme moi par la question des poids atomiques et dire : Le nombre qui était autrefois le poids absolu d'un atome n'est rien moins qu'une valeur absolue pour la plupart des éléments. En général nous voyons en effet que chaque élément possède plusieurs isotopes de poids atomiques différents de telle sorte que le poids atomique mesuré n'est qu'une moyenne dont la valeur reste plus ou moins fortuite, car elle dépend essentiellement du rapport des masses des isotopes dans la préparation qui a servi à la détermination du poids atomique. À supposer même que nous soyons en présence d'un isotope unique, dans l'état actuel de nos connaissances, il serait tout à fait antiscientifique d'en considérer le poids comme quelque chose d'absolu. Suivant les conceptions les plus récentes de la physique, conceptions qui s'appuient sur les expériences de destruction des noyaux atomiques, dues à Rutherford, il faut remettre en valeur la vieille hypothèse de Prout qui veut que tous les éléments soient construits avec un

seul : l’hydrogène. Or dans cette hypothèse, le poids atomique perd son caractère absolu, il n’est plus qu’un simple rapport.

Ayant obtenu cet avantage apparent, mon adversaire se déciderait peut-être à jouer sa carte maîtresse : la théorie de la relativité générale. Cette seule dénomination lui suffira pour rejeter comme rétrograde et démodée toute tentative de considérer le temps et l’espace comme des absolus.

Il faudrait bien, cependant, se garder de tirer des conclusions aussi radicales de termes qui ne sont peut-être pas choisis toujours de la façon la plus heureuse, sous tous les rapports. Rappelons-nous, en effet, que la théorie de la relativité a abouti à la découverte de la valeur absolue de l’énergie. C’est être bien superficiel que de s’en tenir, sans plus, à la nécessité d’introduire le temps et l’espace dans le domaine du relatif, sans se demander où peut mener un pareil changement. Certes, dans l’histoire des sciences, il est fréquemment arrivé — et cela a été en général un progrès — que certaines notions, jadis considérées comme absolues, n’ont plus été ensuite regardées que comme relatives ; mais l’absolu n’a nullement été éliminé pour cela, les bornes de son domaine ont été simplement reculées. À mon sens, toute négation de l’absolu se ramène à l’attitude de quelqu’un qui, cherchant la cause d’un phénomène et ayant découvert que la circonstance qui avait été longtemps tenue pour telle ne l’est pas en réalité, en tirerait la conclusion que ce phénomène n’a pas de cause. Non, il n’est pas possible de ranger tout dans le relatif, pas plus qu’il n’est possible de tout définir et de tout prouver. Pour éprouver la valeur d’un

concept quel qu’il soit, il est nécessaire de faire appel au moins à un autre concept qui n’a pas besoin d’être défini ; de même, toute démonstration doit s’appuyer sur une proposition fondamentale qui est tenue pour juste sans démonstration. C’est ainsi que le relatif s’appuie, en dernière analyse, sur un absolu indépendant. Autrement, le concept, la preuve et le relatif lui-même, restent suspendus en l’air comme un vêtement à qui il manquerait un clou pour l’accrocher. L’absolu est le point de départ fixe inéluctable, la seule question est de le placer là où il doit être.

Reprenons maintenant les arguments de notre contradicteur supposé. Il ne doit pas être difficile de leur trouver une réplique. La réduction de tous les poids atomiques à celui de l’hydrogène, si on peut y parvenir un jour, sera une des conquêtes les plus fondamentales de la science de la matière. Elle signifiera que, à toute matière, il faut attribuer une origine commune. Mais alors les deux parties de l’atome d’hydrogène, le noyau positif ou proton et l’électron négatif, constitueront, avec le quantum d’action, les pierres avec lesquelles tout l’édifice du monde physique sera considéré comme bâti et ces grandeurs, tant qu’elles ne pourront être ramenées l’une à l’autre, ou toutes les deux à une troisième, auront nécessairement un caractère absolu. Et voilà l’absolu retrouvé, à un échelon plus élevé cette fois, et sous une forme plus simple. Poursuivant notre examen, nous aborderons maintenant les fondements mêmes de l’édifice majestueux de la relativité. Suivant Newton, puis Kant, nos concepts du temps et de l’espace sont des formes absolues *a priori* de notre intuition.

Pour la théorie de la relativité, en raison de l’arbitraire inhérent au choix du système de référence et du système de mesure, il convient de donner, en quelque façon, à ces notions un caractère seulement relatif, et c’est là, sans doute, une idée qui touche au tréfonds de notre connaissance en physique. Mais, si l’espace et le temps perdent leur caractère d’absolu, ce dernier n’est pas le moins du monde expulsé de l’univers. Il s’est retiré plus loin, je veux dire dans la métrique du continu à quatre dimensions qui unit espace et temps, par l’intermédiaire de la vitesse de la lumière. Cette métrique se présente, en effet, comme quelque chose où il n’y a plus trace d’arbitraire et qui est pleinement indépendante de tout le reste, c’est-à-dire comme un absolu.

Ainsi donc, la théorie de la relativité, si souvent mal comprise, non seulement n’a pas supprimé l’absolu, mais encore elle a fait ressortir mieux que jamais combien la physique est liée à un monde extérieur absolu. Si l’absolu ne se trouvait que dans nus impressions personnelles, comme le veulent certains théoriciens de la connaissance, il y aurait, en principe, autant de physiques qu’il y a de physiciens et, dans ces conditions, rien de plus stupéfiant que de constater qu’il est encore possible de nos jours d’élaborer une physique dont le contenu est identique pour toutes les intelligences des savants, malgré la diversité de leurs impressions individuelles. En ces temps où le courant des idées positivistes est si fort, il ne va pas de soi, et il convient, au contraire, de faire remarquer, que ce n’est pas nous qui créons le monde extérieur pour des raisons de commodité ; mais que c’est le monde extérieur qui s’impose à

nous avec la puissance irrésistible des forces élémentaires. En tâchant de libérer nos idées sur les phénomènes naturels de tout ce qu'elles ont d'individuel, de conventionnel, de fortuit, nous cherchons l'autonome derrière le dépendant, l'absolu derrière le relatif, l'immuable derrière le changeant. Autant que je puis m'en rendre compte, cette tendance s'observe, non seulement en physique, mais dans toutes les autres sciences ; que dis-je, elle dépasse même le domaine de la science, elle s'élève à celui du beau et du bien.

Mais je m'aperçois que je suis en danger de m'écarter de mon sujet car je ne m'étais pas proposé d'exposer des thèses pour les prouver ensuite. Ce que je voulais c'est laisser parler eux-mêmes certains faits appartenant à la physique, en me réservant de les faire suivre de quelques considérations générales.

Pour finir, il me reste à examiner une question qui s'impose mais qui n'en est pas moins fort captieuse. Qui pourrait nous garantir qu'un concept, auquel nous attribuons aujourd'hui un caractère absolu, ne devra pas être considéré plus tard comme relatif, en se plaçant à un point de vue nouveau et céder la place à un autre absolu de caractère plus élevé. À cette question il n'y a qu'une réponse : D'après tout ce que nous savons personnellement et ce que nous avons appris, il n'y a personne au monde qui puisse nous donner une telle assurance. Bien plus, nous devons tenir pour très certain que jamais nous ne parviendrons à étreindre véritablement l'absolu. Ce dernier n'est bien plutôt, pour nous, qu'un but idéal ; nous l'avons toujours devant les yeux, mais nous ne l'atteindrons jamais.

Certes, c’est là une pensée attristante, mais de laquelle il faut bien nous accommoder. Il en va de nous comme d’un alpiniste gravissant une pente inconnue ; jamais il n’est sûr qu’il n’y a pas, derrière la cime vers laquelle il tend de tous ses efforts, un autre sommet encore plus élevé. Sa consolation, comme la nôtre, sera de se dire qu’il va de l’avant et monte toujours plus haut et ainsi se rapproche toujours du but tant désiré. Poursuivre toujours sa marche d’approche et serrer le but de plus près, telle est la tâche propre et incessante de toute science. C’est pourquoi nous répéterons, après Gottfried Ephraim Lessing : « Ce n’est pas la possession de la vérité qui fait le bonheur du savant, c’est l’effort qui le porte dans le sens du succès ; car tout arrêt fatigue et énerve à la longue ». Toute vie saine et vigoureuse s’épanouit par le travail et dans le progrès « du relatif vers l’absolu ».

CHAPITRE VII

DE LA NATURE DES LOIS PHYSIQUES

I

Que faut-il entendre par loi physique ? Une loi physique est une proposition qui établit un lien permanent et impossible à rompre entre des grandeurs physiques mesurables, de telle sorte que l'on peut calculer une de ces grandeurs quand on a mesuré les autres. Avoir une connaissance aussi complète que possible des lois physiques, tel est le but ardemment poursuivi par tout physicien. Celui-ci peut d'ailleurs se placer à un point de vue purement utilitaire et considérer que la valeur propre des lois physiques leur vient de ce qu'elles nous épargnent la nécessité de mesures nombreuses et coûteuses ; mais il peut aussi s'élever à un point de vue supérieur et y trouver la satisfaction d'un profond besoin de savoir et un point d'appui solide pour se faire une idée de l'univers.

Maintenant, comment est-on parvenu à établir l'existence des lois physiques que nous connaissons et sous quel aspect se présentent-elles à nous ? Tout d'abord, il faut bien le reconnaître, il n'est pas évident que le monde obéisse à des lois physiques, il n'est même pas évident que la permanence de leur

empire jusqu'à l'heure actuelle étant admise, il en sera toujours de même à l'avenir. Il est, en effet, tout à fait concevable et il n'est au pouvoir de personne d'empêcher qu'un beau soir, à la suite d'un événement tout à fait imprévu, la nature nous joue le tour de s'abandonner à une sorte de jeu fantaisiste et nous donne le spectacle de l'incohérence la plus complète et la plus irréductible à l'idée d'une loi quelconque ; il ne resterait plus alors à la science que la ressource de se déclarer en faillite. C'est pourquoi aussi elle est contrainte à admettre l'existence des lois physiques à titre de postulat primordial et préalablement à toute démarche afin de pouvoir vivre et se développer. Pour employer le langage d'Emmanuel Kant, nous dirons qu'elle met le principe de causalité au nombre des catégories *a priori*, sans lesquelles aucune connaissance n'est possible. Il s'ensuit alors nécessairement que l'essence des lois physiques n'est pas plus déterminable par le seul travail de la réflexion que ne peut l'être, *a priori*, le contenu des diverses lois physiques particulières. Pour cette détermination il n'est qu'un seul moyen, se tourner vers la nature et l'interroger par les expériences les plus nombreuses et les plus diverses ; comparer ensuite les résultats de ces expériences et les traduire en formules aussi simples et aussi générales que possible, en un mot, se servir de la méthode inductive.

Comme le contenu d'une expérience est d'autant plus riche que les mesures qui en sont à la base sont plus exactes, il s'ensuit que le progrès de la connaissance en physique est lié de la façon la plus étroite aux degrés de perfection des instruments et de la technique des mesures. Toute l'histoire de la physique est

là pour témoigner qu’il en est bien ainsi. Mais la mesure n’est pas tout ; elle n’est, en effet, de soi, qu’un événement lié à un ensemble de conditions particulières et notamment à un temps et à une situation spatiale bien délimités ; elle est même liée à un instrument de physique spécial et à tel expérimentateur à l’exclusion de tel autre. S’il y a des cas où la généralisation va de soi, il y en a d’autres aussi où il est extrêmement difficile de trouver la loi commune sous laquelle les événements étudiés doivent se ranger. Cela peut arriver, soit parce que la chose paraît absolument impossible, soit au contraire, et cela n’est pas plus satisfaisant, parce qu’il y a un trop grand nombre de généralisations entre lesquelles le choix est possible.

La seule issue à une situation de ce genre, c’est d’admettre une certaine supposition à titre d’essai, autrement dit de faire une hypothèse et de voir à quoi elle aboutit. Il peut arriver qu’une hypothèse forgée pour l’exploration d’un certain domaine se montre également féconde dans un autre domaine très éloigné en apparence du premier. C’est là un très bon signe ; car on peut en conclure qu’elle est l’expression d’une loi ayant un sens profond et exprimant une relation particulièrement intime et inhérente à la nature des choses. On peut donc s’attendre dans ce cas à un véritable progrès dans notre connaissance du monde.

Si donc une hypothèse appropriée est indispensable dans tout travail de recherche inductive, il est impossible de ne pas se demander comment on peut arriver à trouver de telles hypothèses. Malheureusement il n’existe pas de prescriptions

générales à cet égard. La logique seule est insuffisante, même quand y est jointe la possession du trésor d'expérience le plus riche et le plus varié. Ce qui importe ici, c'est plutôt l'intuition immédiate, l'inspiration heureuse. Très souvent il s'agira d'un rapprochement de pensées, paraissant au premier abord très osé, qui ne saurait être l'œuvre que d'une imagination créatrice vivante et originale, guidée par une connaissance exacte des faits.

Dans la plupart des cas, il s'agit de l'apparition de certaines analogies d'images, préparant à des transpositions d'un domaine dans un autre et inclinant les esprits dans le sens d'un nouveau pas en avant vers l'unification de nos conceptions sur l'univers.

Voici donc le savant parvenu à un point où s'ouvrent pour lui les perspectives les plus brillantes et pourtant, en cet instant, un grave danger le guette. En effet, même si le pas difficile a été heureusement franchi, même si la nouvelle hypothèse a prouvé sa fécondité, il n'en faut pas moins lui donner tout le développement qu'elle comporte et, aussi, en lui trouvant une formule appropriée, extraire ce qui en constitue le noyau substantiel, après élimination de tous les accessoires plus ou moins accidentels. Or ce n'est pas là une besogne aussi simple qu'il pourrait le paraître au premier abord. Le rapprochement d'idée heureux qui a permis de jeter un pont donnant accès à un nouveau domaine dans l'ordre de nos connaissances, doit, en général, être regardé comme une construction provisoire, destinée à être remplacée peu à peu par une construction plus

solide, capable de supporter le feu de cette grosse artillerie qu’est la logique des critiques.

Toute hypothèse est, il ne faut pas l’oublier, l’œuvre d’une fantaisie exploratrice et l’imagination est une faculté purement intuitive. Or si l’imagination est indispensable dans la création d’une hypothèse, elle n’en est pas moins un auxiliaire d’une valeur très douteuse quand il s’agit de l’élaboration d’une théorie rationnelle ou de la mise sur pied d’une démonstration logique. Il n’est pas rare de voir un savant aboutir à des généralisations hâtives et tout à fait insoutenables pour avoir eu une confiance trop absolue en des vues intuitives, confiance cependant très explicable en raison d’une abondante moisson de succès obtenue antérieurement sur quelques points particuliers. Il faut aussi ajouter à cela que les créateurs d’une théorie nouvelle et efficace, se sentent, en général, peu inclinés, soit pour des raisons de commodité, soit pour des mobiles d’ordre sentimental, à faire subir des changements importants aux idées et à la tournure d’esprit qui les ont conduit au succès. On les verra souvent, au contraire, peser du poids de l’autorité la plus légitimement acquise, pour maintenir les anciens points de vue. Le résultat d’une telle attitude sera d’entraver sérieusement l’évolution normale de la théorie.

Je pense que quelques exemples, tirés de l’histoire de la physique, ne seront pas inutiles comme illustration de ce qui précède.

Les premières notions que l’on ait eues au sujet de lois physiques se rapportent naturellement au domaine où les

premières mesures exactes ont pu être effectuées. Elles concernent le temps et l'espace, c'est-à-dire le domaine de la mécanique. Il est donc facile de comprendre comment les premières relations, à forme de loi, qui furent découvertes, se rapportent à des mouvements ayant lieu dans des conditions qui excluent l'intervention fortuite de toute influence perturbatrice, c'est-à-dire au mouvement des corps célestes, Il y a déjà des milliers d'années que les peuples civilisés de l'Orient ont su tirer de leurs observations des formules permettant de calculer, des années à l'avance, et avec une grande précision, le mouvement des planètes. Tout progrès dans l'exactitude des mesures, entraînait un progrès parallèle dans les formules. Ainsi nous avons vu paraître successivement les théories de Ptolémée, de Copernic, de Kepler, dont chacune marquait un progrès sur la précédente, tant en ce qui concerne la simplicité que l'exactitude. Toutes ces théories ont ceci de commun qu'elles se proposent de résoudre le problème suivant : Étant donnée une planète et en supposant connu l'instant où elle est observée, trouver quelle est à cet instant la position de la planète. Naturellement pour chaque planète, il existe une relation qui lui est propre entre les temps et les positions, mais cette relation ne saurait s'appliquer à aucune autre planète, bien que les mouvements planétaires aient beaucoup de traits communs.

Newton fait un pas décisif en résolvant un problème beaucoup plus général : trouver une loi unique valable pour tous les corps célestes, et dont les formules donnant les mouvements de chaque planète seraient des applications à des cas particuliers.

Son succès fut complet quand il parvint à donner à sa loi un caractère d'indépendance absolue à l'égard de tout instant particulier, c'est-à-dire quand il remplaça le temps par la différentielle du temps. La théorie du mouvement planétaire de Newton ne parle plus d'une loi exprimant une relation entre la position d'une planète et le temps ; ce qu'elle donne c'est une relation entre l'accélération d'une planète et sa distance au soleil. Cette loi se présente sous la forme d'une équation différentielle vectorielle, valable pour toutes les planètes. En conséquence, si la position et la vitesse d'une planète à un instant donné sont connues, on peut déterminer sans ambiguïté toutes les caractéristiques de son mouvement à un instant quelconque.

Que la théorie de Newton n'ait pas seulement été une manière nouvelle de se représenter l'univers, mais qu'elle ait encore eu le caractère d'un progrès dans la connaissance du rapport qui lie les choses dans la réalité, cela ressort très clairement de l'examen des résultats obtenus grâce à elle et qui ne sont pour nous que le développement d'une même idée. Elle surpasse les formules de Kepler, non seulement en exactitude (elle permet, par exemple, de prévoir les perturbations subies par la trajectoire elliptique de la terre autour du soleil du fait que cette dernière se rapproche de temps en temps de Jupiter), mais de plus, grâce à elle, il est possible de calculer, toujours en plein accord avec les mesures expérimentales, les mouvements des autres corps célestes, telles que les comètes, les étoiles doubles, etc., dont les lois de Kepler étaient absolument incapables de rendre compte. Mais le principal triomphe de

l’actif de la loi de Newton a été son application immédiate aux mouvements qui ont lieu à la surface terrestre, tels que la chute des corps et les mouvements du pendule dont Galilée avait formulé les lois comme conséquence de ses mesures. Bien plus, la même loi se trouve donner la clef de certains phénomènes étonnants et, jusque-là incompréhensibles, tels que le flux et le reflux, la rotation du plan d’oscillation pendulaire, la précession dans le mouvement de la toupie et d’autres encore.

Mais ce qui nous intéresse le plus, à l’heure actuelle, c’est de savoir comment Newton parvint à trouver son équation différentielle. Ce ne fut pas, comme on pourrait se le figurer, en rapprochant directement l’accélération d’une planète de sa distance au soleil et en cherchant si on ne pourrait trouver une relation numérique entre l’une et l’autre ; ce fut par l’élaboration d’un concept qui pût servir, pour ainsi dire, d’intermédiaire entre la notion d’accélération et celle de position : ce rôle devait être joué par la force. Il imagina, qu’en raison de sa situation par rapport au soleil, toute planète est soumise à une attraction qui est dirigée vers cet astre et que cette force se manifeste en provoquant une certaine modification dans le mouvement de la planète. Il y eut ainsi, d’une part, la loi de l’inertie, et d’autre part, la loi de la gravitation.

La notion de force tire certainement son origine, comme le mot l’indique, de la sensation musculaire éprouvée lors du soulèvement d’un poids ou du lancement d’une balle,

seulement cette notion fut généralisée et étendue à tout changement survenant dans un mouvement quelconque, même à ceux qui ne peuvent pas être obtenus, si peu que ce soit, par l'effort musculaire humain.

Il n'est donc pas étonnant de voir Newton attacher une importance aussi décisive à la notion de force qui lui avait valu de tels succès, bien que cette notion n'apparaisse aucunement, il faut le remarquer, dans la loi du mouvement proprement dit. La force est seulement considérée comme étant la cause du changement survenu dans le mouvement. Avec le temps, l'importance de la force newtonnienne devint même si grande qu'elle prit le caractère de concept fondamental, non seulement en mécanique, mais dans la physique tout entière.

L'image que nous offre la physique contemporaine présente un certain contraste avec cet état de choses. Aussi n'est-ce point un paradoxe que de dire que la force newtonnienne a perdu la signification fondamentale qu'elle avait en physique. Dans la mécanique actuelle, ce n'est plus qu'une grandeur secondaire ; elle a été remplacée par une notion d'un caractère plus élevé, plus général : la notion de travail, de potentiel. La force est alors définie comme une chute de potentiel, comme un gradient négatif de potentiel.

Mais, objectera-t-on, comment peut-on considérer le travail comme étant la notion primordiale alors que, s'il y a un travail, il y a toujours une force qui effectue ce travail ? Parler ainsi, c'est parler en physiologiste et non en physicien. Certes, en ce qui concerne le travail accompli quand on soulève un poids, la

contraction musculaire, avec les sensations concomitantes, sont bien le phénomène primaire qui cause la manifestation du mouvement. Mais il convient de distinguer très nettement ce phénomène purement physiologique de la force d'attraction exercée par la terre sur le poids qui est le phénomène physique intervenant en cette occasion. Or ce phénomène est uniquement conditionné par le potentiel de gravitation qui est la notion fondamentale.

La supériorité du potentiel sur la force ne lui vient pas seulement de ce que, par son introduction, les lois physiques reçoivent une forme plus simple, elle vient aussi de ce que la notion de potentiel a une signification s'étendant beaucoup plus loin que la notion de force. Elle dépasse notamment le domaine de la mécanique et elle s'applique aux affinités chimiques où, évidemment, il ne saurait plus être aucunement question d'une force newtonnienne. Sans doute, le concept de potentiel n'a-t-il plus l'avantage d'être immédiatement intuitif comme celui de force en raison de sa relation avec le sens musculaire. L'élimination du concept de force a donc diminué grandement le caractère d'intuitivité des lois physiques, mais il était dans la nature des choses elles-mêmes qu'il en fût ainsi. La valeur d'une loi physique ne lui vient pas en effet de sa conformité aux organes des sens humains, mais de sa conformité aux choses elles-mêmes.

Néanmoins, à mon avis, quand il s'agira d'enseigner la mécanique, il conviendra toujours de débuter en prenant son point de départ dans la force newtonnienne, de même que si

l’on parle d’optique, il est tout d’abord opportun de faire appel au sens de la vue, de même en thermodynamique on se référera au sens thermique. Plus tard seulement il conviendra de trouver une base plus précise. Cependant il ne faudrait pas oublier, non plus, que la signification de tout concept et de toute loi physique repose en dernière analyse sur ses relations avec les organes de nos sens humains, et nous touchons là un trait éminemment caractéristique du travail de recherche scientifique. Pour pouvoir établir des concepts et des hypothèses valables, il faut d’abord que nous fassions appel à un pouvoir d’intuition intimement lié à nos sensations spécifiques, car tel est le réservoir où nous puisons toutes nos idées ; mais si, de là, nous voulons parvenir aux lois physiques, nous devons, autant que possible, faire abstraction de nos images intuitives et rendre nos définitions libres de toute attache avec une représentation superflue, c’est-à-dire avec toutes celles qui n’ont point de lien logique nécessaire avec les mesures. Une fois les lois formulées, et leurs résultats déduits par voie mathématique, pour les rendre utilisables, il faudra les retraduire dans la langue de notre univers sensible. C’est là, jusqu’à un certain point un cercle vicieux, mais il est impossible de s’en passer ; car c’est l’abstraction seule qui libère les lois physiques de toute attache anthropomorphique et leur permet de se manifester sous une forme simple et générale.

On rencontre en physique des exemples nombreux de concepts intermédiaires semblables à la force newtonnienne ; ils servent d’auxiliaires en raison de leur caractère intuitif. À ce point de vue, je me bornerai à mentionner l’idée de la pression

osmotique qui s'est montrée si féconde en chimie physique. Cette notion fut introduite par Van't Hoff pour rendre intuitive les lois physiques des solutions, notamment la loi de l'abaissement du point de fusion et de la tension de vapeur. La pression osmotique, on le sait, est difficile à mettre en évidence et elle ne se laisse mesurer que très imparfaitement parce qu'il faut faire appel à un appareillage compliqué utilisant ce que l'on appelle des parois semi-perméables. L'intuition pénétrante du grand savant en est donc d'autant plus admirable, puisqu'il a réussi à formuler ses lois en s'appuyant sur un matériel d'observations peu abondant. Dans la formule qu'on donne habituellement des lois de Van't Hoff, la pression osmotique intervient aussi peu que la force newtonnienne dans la mécanique moderne.

Il existe aussi d'autres concepts éminemment intuitifs d'un genre différent qui se sont montrés très féconds quand il s'est agi de l'élaboration d'hypothèses ; mais, contrairement à ceux dont il vient d'être question, il n'en ont pas moins contrarié directement le progrès au cours de l'évolution ultérieure de la physique. Parmi ces concepts il en est un qui mérite une mention spéciale. De même que l'on s'était habitué à soupçonner l'action causale d'une force derrière toutes les transformations naturelles, de même on fut très incliné à considérer comme une substance toute grandeur invariable, toute constante. Or le concept de substance, s'il joue en physique un rôle important, depuis des temps immémoriaux, n'a pas néanmoins toujours contribué au progrès. D'abord il est évident que toute loi de conservation peut s'exprimer en termes

de substance et cette manière de se représenter les choses a l’avantage de rendre la loi intuitive et d’en faciliter l’utilisation. Est-il possible, en effet, de donner une idée plus tangible d’une grandeur demeurant quantitativement la même à travers toutes ses transformations, qu’en faisant appel à la représentation d’un corps matériel en mouvement. Pour cette raison, il y a toujours eu une tendance en faveur de l’explication des phénomènes naturels par des mouvements de portions infimes de substances, quantitativement déterminées. Pour rendre compte de la propagation de la lumière, il fut d’abord fait appel aux mouvements ondulatoires d’une substance : l’éther lumineux ; et, effectivement, les principales lois de l’optique ont pu être déduites de cette hypothèse, en pleine conformité avec l’expérience. Ce fut seulement plus tard que la théorie mécanique substantielle de la lumière cessa de se montrer féconde et s’égara dans des discussions stériles.

Dans le domaine de la chaleur, également, la notion de substance a rendu d’éminents services. Le haut état de perfection auquel fut amené la calorimétrie dans la première moitié du siècle dernier est dû à des travaux guidés par l’hypothèse d’une substance calorique s’écoulant, sans gain ni perte, du corps le plus chaud vers le corps le plus froid. Plus tard, lorsqu’il fut démontré que la quantité de chaleur pouvait être augmentée, par exemple dans le cas du frottement, l’on vit la théorie substantielle de la chaleur passer à la défensive et chercher son salut dans des hypothèses additionnelles. Cela lui réussit quelque temps, mais l’échec final n’en fut pas moins inévitable.

En électricité, la réflexion la plus superficielle suffit à montrer les conséquences suspectes qui peuvent être la suite d'une généralisation abusive de la notion de substance. Nous y trouvons, il est vrai, la loi de la conservation de la quantité d'électricité, la conception du courant électrique qui se rattache à cette loi et la loi des échanges entre des conducteurs parcourus par des courants, tout cela peut être rendu très intuitif en faisant intervenir la notion d'une substance électrique douée de propriétés dynamiques se manifestant extérieurement. Mais l'analogie ne peut plus se poursuivre, si l'on observe qu'il faut admettre l'existence d'une substance positive et celle d'une substance négative, se neutralisant complètement l'une l'autre. Voilà certes un phénomène tout à fait inacceptable dans le cas d'une véritable substance. D'autre part, il est également impossible de faire sortir du néant deux substances opposées.

Tout ceci prouve que les images représentatives et les concepts qui s'appuient sur elles, si elles sont, en physique, des auxiliaires indispensables de la recherche et si elles ont permis dans des cas innombrables de frayer la voie à des connaissances nouvelles, n'en doivent pas moins être utilisées avec la plus grande circonspection, même si pendant un certain temps leur valeur n'a pu être contestée.

Le seul guide dans la voie du progrès qui suit la découverte est et demeure la mesure, avec les notions qui s'y rattachent immédiatement ou s'en déduisent par voie logique. Tout autre genre de déduction, surtout ceux qui s'appuient sur une

prétendue évidence, doit toujours être considéré avec une certaine méfiance. Ce n’est pas, en effet, l’intuition mais la seule raison qui décide du pouvoir contraignant d’une démonstration mettant en œuvre des concepts bien définis.

II

Jusqu’ici nous nous sommes surtout occupés de la question de savoir comment on parvient à la connaissance des lois physiques, nous allons maintenant examiner de plus près en quoi consistent ces lois et ce qui fait leur essence propre.

Une loi physique s’exprime ordinairement à l’aide d’une formule mathématique. Cette formule permet, étant donné un système physique soumis à des conditions déterminées, de calculer à l’avance les phénomènes dont ce système sera le siège. Considérées de ce point de vue, les lois physiques peuvent déjà être divisées en deux grands groupes.

Les lois du premier groupe ont ceci de particulier qu’elles conservent leur validité si on y change le signe de la variable « temps » ou, autrement dit, tout processus qui obéit à ces lois peut aussi se dérouler en sens inverse sans y contrevenir. Les lois de l’électrodynamique et de la mécanique, pour autant que les facteurs thermiques ou chimiques en sont exclus, sont des exemples du premier groupe. Par exemple, un corps qui tombe sans frottement aura un mouvement accéléré, d’après les lois de la mécanique ; d’après ces mêmes lois le même corps en s’élevant aura un mouvement retardé. Un pendule peut aussi bien osciller de droite à gauche que de gauche à droite. Une

onde peut se propager dans une direction tout comme dans la direction opposée, elle peut s'écarter d'un centre ou s'en rapprocher. Une planète peut décrire sa trajectoire autour du soleil aussi bien dans un sens que dans l'autre. Bien entendu la question de savoir si l'inversion du mouvement est réalisable n'a rien à voir avec la réversibilité, aussi nous abstiendrons-nous de l'examiner. Il s'agit en effet ici de la loi elle-même et non des circonstances où elle trouve son application. Les lois du second groupe sont, au contraire, telles que le signe de la variable temps y joue un rôle essentiel, aussi les phénomènes régis par ces lois se déroulent-ils dans un seul sens : ils sont irréversibles. C'est le cas de tous les phénomènes mettant en jeu un transport de chaleur ou une affinité chimique.

Dans le cas d'un frottement, les vitesses relatives vont toujours en diminuant, jamais en augmentant. Dans le cas de la conduction thermique, c'est toujours le corps le plus froid qui s'échauffe et le corps le plus chaud qui se refroidit. Dans le cas de la diffusion, le mélange des corps se poursuit toujours dans le sens d'une homogénéisation croissante, jamais dans le sens d'une démixtion. Aussi voyons-nous les phénomènes irréversibles aboutir toujours à un état final. Le frottement aboutit à l'état de repos ; la conduction, à l'équilibre thermique ; la diffusion à l'homogénéité totale. Les phénomènes réversibles, au contraire, à moins qu'une action extérieure n'intervienne, se poursuivent sans fin en une suite indéfinie d'oscillations. Comment parvenir à trouver une enseigne commune pouvant convenir à deux catégories de lois aussi opposées ? Et pourtant, c'est là chose absolument

nécessaire à l'unification de nos connaissances en physique. La génération qui a précédé la nôtre a subi d'une façon tout à fait prépondérante l'influence d'une théorie physique : l'énergétique ; c'est pourquoi elle a cherché à faire disparaître le contraste en assimilant, par exemple, le transport de la chaleur d'une température élevée à une autre plus basse à la chute d'un poids ou encore à un pendule descendant d'un niveau élevé vers un autre plus bas. Mais c'est là un point de vue qui néglige précisément tout l'essentiel, à savoir le fait qu'un pendule qui a atteint sa position la plus basse possède, au même moment, sa vitesse la plus grande, d'où il résulte qu'il remonte de l'autre côté de sa position d'équilibre en vertu de son inertie. Par contre, le courant thermique allant d'un corps chand vers un corps froid est d'autant plus lent que la différence des températures est plus faible. Il ne peut donc aucunement être question d'un dépassement de l'état où la température est uniforme, en vertu d'une autre sorte d'inertie.

De quelque manière que l'on s'y prenne, le contraste demeure donc le même entre les phénomènes réversibles et irréversibles. Il ne reste alors plus qu'une seule ressource : trouver un point de vue entièrement nouveau permettant de faire apparaître certaines relations entre les deux catégories de phénomènes et cela en ramenant, dans la mesure du possible, les lois d'une catégorie à celles de l'autre. La question qui se pose est la suivante : des phénomènes réversibles ou irréversibles quels sont ceux qui doivent être considérés comme les plus simples, les plus élémentaires ? En nous plaçant à un point de vue formel, purement extérieur, nous aurons déjà une indication à

ce sujet. Toute formule physique contient, en plus des grandeurs variables, dont les mesures donnent les valeurs dans chaque cas particulier, certaines grandeurs constantes déterminées une fois pour toutes, ce sont elles qui donnent son caractère propre à la relation entre les variables dont la formule est l'expression. Or si l'on examine de près ces constantes, on s'aperçoit que ce sont toujours les mêmes qui reviennent tout le temps avec la même valeur dans le cas des phénomènes réversibles, malgré la diversité des conditions extérieures. Nous avons, par exemple : la masse, la constante de gravitation, la charge électrique, la vitesse de la lumière. Les constantes des phénomènes irréversibles seront : le coefficient de conductibilité thermique, le coefficient de frottement, la constante de diffusion ; or leurs valeurs dépendent toujours plus ou moins des circonstances extérieures comme la température, la pression, etc.

De cette différence de comportement on peut, tout naturellement, inférer que les constantes du premier groupe, de même que les lois qui s'y rattachent, sont les plus simples, qu'elles ne sont pas réductibles à d'autres, tandis que les constantes et les lois du second groupe ont un caractère plus complexe. Pour justifier nos conjectures, il faudra, il est vrai, faire appel à des considérations d'un genre plus raffiné et examiner les phénomènes pour ainsi dire à la loupe. Si les phénomènes irréversibles sont réellement de nature composite, les lois qui les régissent ne peuvent s'appliquer qu'en gros, elles doivent donc se présenter comme des lois statistiques qui ne sont qu'une appréciation macroscopique globale de la

résultante moyenne d’un grand nombre de phénomènes élémentaires. Plus le nombre de ces éléments composants est petit, plus on devra s’attendre à des exceptions fortuites notables aux lois macroscopiques. En d’autres termes, si ce que nous avançons est exact, les lois des phénomènes irréversibles, — frottement, conductibilité thermique, — doivent toutes être inexactes ; considérées à l’échelle microscopique, elles doivent comporter des exceptions dont l’importance grandit d’autant plus que l’observation du phénomène se fait plus précise.

Or telle est bien la conclusion, de jour en jour plus certaine, à laquelle nous conduit aussi l’expérience, grâce au perfectionnement extraordinaire réalisé dans les méthodes de mesure. Si les lois des phénomènes irréversibles sont valables avec une très haute approximation, cela tient uniquement à ce qu’ils sont ordinairement la résultante d’un nombre énorme de phénomènes élémentaires. Prenons, par exemple, un liquide de température uniforme d’après la loi macroscopique de la conductibilité thermique, il ne doit exister aucun transport de chaleur dans ce liquide. Or, à parler en toute rigueur, ceci est absolument faux, car la chaleur est conditionnée par les mouvements rapides dont sont animées les molécules de ce liquide. La conductibilité thermique sera donc due à des échanges de vitesse entre molécules et, par suite, l’uniformité de la température ne signifiera donc pas que toutes les vitesses sont égales mais, seulement, que la valeur moyenne de toutes les vitesses est la même dans deux volumes élémentaires de liquide pourvu qu’ils renferment, tous les deux, un très grand nombre de molécules. Si nous prenions, par contre, un élément

de volume ne contenant que des molécules relativement peu nombreuses, la valeur moyenne de leurs vitesses pourrait subir des variations dans le temps et cela, d’autant plus, que l’élément de volume considéré serait plus petit. Tout ceci nous le répétons n’est pas une simple vue de l’esprit, mais a été pleinement confirmé par l’expérience. En est-il une plus frappante, à ce point de vue, que le mouvement brownien ? Ce mouvement peut s’observer au microscope sur des grains de poussière en suspension ; ces grains sont heurtés en tous sens par les molécules invisibles du liquide et cela avec une violence d’autant plus grande que la température est plus élevée. Si maintenant nous faisons l’hypothèse, et il n’y a à cela aucune objection de principe, que chaque choc pris en particulier est un phénomène réversible obéissant à des lois dynamiques, nous pourrons dire que la considération du phénomène au point de vue microscopique nous a permis de ramener les lois des phénomènes irréversibles, lois statistiques, approchées et valables seulement en gros, aux lois exactes de la dynamique.

L’introduction en physique de lois statistiques a été très féconde et elle n’été la cause de grands progrès, c’est pourquoi il s’est produit, à leur égard, un changement remarquable dans les idées des physiciens. Autrefois les énergétistes auraient, plus ou moins, mis en doute l’existence des transformations irréversibles ; aujourd’hui, au contraire, nous voyons s’ébaucher, un peu partout, des tentatives ayant pour but de mettre au premier plan les lois à forme statistique en y ramenant toutes les autres lois, jusqu’alors regardées comme

dynamiques ; même les lois de la gravitation, à tel point qu'il n'y aurait plus dans la nature aucune loi absolument contraignante. De fait, un point demeure certain : tout ce qui, dans la nature, peut être contrôlé par des mesures a ceci de particulier que le résultat de ces mesures ne peut jamais s'exprimer par un nombre bien défini ; car, dans toute mesure, il y a inévitablement des causes d'erreur qui entraînent une certaine indétermination. Il en résulte que jamais aucune mesure ne pourra nous permettre de savoir si une loi naturelle est d'une exactitude absolue ou seulement approchée. D'autre part, il n'est pas de théorie de la connaissance pouvant nous conduire à un résultat plus satisfaisant. Comme nous l'avons déjà fait remarquer incidemment, nous ne sommes même pas en état de prouver qu'il y a des lois naturelles : comment pourrions-nous donc démontrer que ces lois ont une valeur absolue ?

À s'en tenir au point de vue logique, l'hypothèse que toutes les lois sont à forme statistique est donc tout à fait justifiée. Mais si l'on me demandait, chose toute différente, cette hypothèse est-elle recommandable ? Je répondrais résolument : non. Il faut, en effet, bien se rendre compte que les seules lois à forme strictement dynamique satisfont pleinement notre besoin de savoir ; alors que les lois statistiques resteront toujours défectueuses, tout simplement parce qu'elles ne sont pas d'une exactitude absolue et qu'elles comportent des cas particuliers exceptionnels. La question de savoir quelles sont les circonstances où ces exceptions se rencontrent n'étant, d'autre part, jamais résolue.

Pourtant la réduction à la normale de ces exceptions apparentes a toujours été une des causes prépondérantes des perfectionnements apportés aux méthodes d'investigation. Si l'on admet que toute loi est, en dernière analyse, une loi statistique, il n'y a aucune raison, en présence d'une loi donnée, de rechercher la cause des écarts expérimentaux observés. Or, en réalité, c'est en cherchant toujours à découvrir derrière les lois statistiques, des lois dynamiques strictement causales que les plus grands progrès de l'atomistique ont toujours été réalisés.

Certes, nous le concédons, jamais aucune mesure ne pourra permettre de savoir si une loi, qui a toujours été vérifiée, aux erreurs d'expériences près, est, ou non, de nature statistique. Mais ceci est tout autre chose que de regarder cette loi comme étant de l'une ou l'autre catégorie en vertu de considérations théoriques. Dans le premier cas, on cherchera entre quelle limites la loi est valide, en apportant un perfectionnement de plus en plus grand aux méthodes de mesure ; dans le second cas on considérera ce genre de recherches comme voué à la stérilité. Or il y a déjà, en physique, trop de temps perdu à la recherche de la solution de pseudo-problèmes pour pouvoir se permettre de négliger des considérations de cet ordre.

À mon sens, il est donc tout à fait dans l'intérêt du progrès d'admettre parmi les postulats de la physique, comme on l'a toujours fait jusqu'ici, à vrai dire, non seulement l'existence des lois, mais aussi le caractère strictement causal de ces lois. Le terme de la recherche scientifique ne pourra donc pas être

considéré comme atteint tant qu'une loi de caractère statistique n'aura pas été ramenée à une ou plusieurs lois de caractère dynamique. Tout ceci ne tend naturellement pas à frustrer les lois statistiques de leur grande importance pratique. La physique, tout comme la météorologie, la géographie et la sociologie devront souvent faire usage de lois statistiques. Mais si personne ne doute que les prétendues oscillations fortuites des courbes observées, soit en climatologie, soit en démographie, soit dans l'établissement des tables de mortalité, n'en sont pas moins régies par des lois causales dans chaque cas particulier ; de même aussi tout physicien aura-t-il toujours le droit de se demander pourquoi tel atome d'uranium a fait explosion plusieurs millions d'années avant tel autre.

La science de la vie psychique, elle-même, ne pourra jamais se dispenser d'une causalité rigoureuse. L'existence du libre arbitre a souvent été invoquée à titre d'objection par les adversaires d'une extension universelle de la causalité. J'ai déjà montré, plus haut, qu'il n'y a aucune contradiction entre la causalité stricte et le libre arbitre. Mais l'argumentation que j'ai présentée a été parfois fort mal comprise, Il sera donc peut-être utile, en raison du très grand intérêt présenté par le sujet, de revenir en quelques mots sur ce sujet.

Le principe de causalité demande que les actes humains et tous les phénomènes psychologiques soient déterminés à chaque instant et chez tout homme par son état interne à l'instant précédent ainsi que par l'influence du milieu qui l'entoure. Or, nous n'avons aucun motif de douter de la vérité de cette

proposition. Dans la question du libre arbitre, l’existence de cette dépendance n’est pas en question, il s’agit seulement de savoir si le sujet qu’elle concerne peut en prendre connaissance. C’est de ce point seul que dépend le fait, pour l’homme, de se sentir libre ou non. On ne pourrait refuser à quelqu’un la conscience de son libre arbitre que s’il pouvait, par application du principe de causalité, prévoir son propre avenir. Mais cela même est impossible, car cette hypothèse renferme en elle-même une contradiction. Toute connaissance véritablement complète suppose, en effet, que l’objet à connaître ne sera pas modifié par des phénomènes intervenant dans le sujet connaissant. Or c’est là une supposition incompatible avec le cas où le sujet et l’objet sont identiques. Ou, pour user de termes plus concrets, la connaissance d’un motif d’action volontaire est un événement interne du sujet qui peut être la source d’un nouveau motif et ainsi le nombre des motifs possibles est augmenté. Cette constatation est une nouvelle connaissance, source éventuelle d’un nouveau motif, la série de ces derniers est donc susceptible de s’accroître indéfiniment. Le sujet ne pourra donc jamais parvenir à la production d’un motif absolument définitif, relativement à l’une de ses propres actions futures, c’est-à-dire à une connaissance incapable de provoquer l’éclosion d’un nouveau motif d’action. Il en est tout autrement si l’on considère une action déjà accomplie. Ici, la volonté ne peut plus être influencée par la connaissance, c’est pourquoi il est toujours possible, en principe, de découvrir un enchaînement strictement causal des motifs d’action. Si quelqu’un venait à

douter de la justesse de ces considérations et ne voyait pas pourquoi un esprit suffisamment intelligent ne pourrait pas être capable d'embrasser la série causale complète des causes qui conditionnent causalement son moi actuel, nous lui demanderions pourquoi un géant suffisamment grand pour dominer toutes choses de son regard ne serait pas aussi capable de se dominer lui-même de ce regard. Non la loi causale ne suffit à aucun homme, même le plus intelligent, pour lui permettre de produire des motifs décisifs, pour aucune de ses actions conscientes. Il lui faut un autre fil conducteur : la loi morale. La plus haute intelligence, l'analyse la plus pénétrante ne sauraient y suppléer.

III

Revenons maintenant à la physique où il n'y a pas en général de complications semblables à celle dont nous venons de parler. Il me reste seulement maintenant à donner une idée de ce qu'est, dans ses grandes lignes, la conception de l'univers à laquelle est arrivée la physique moderne en suivant sa tendance qui est de ramener, comme je viens de le dire, toutes les relations entre les phénomènes à des lois strictement causales. Il suffit d'un coup d'œil rapide pour se rendre compte du changement énorme intervenu à cet égard. On peut le dire, jamais révolution aussi brusque ne s'est produite dans les idées depuis les temps de Newton et de Galilée et nous sommes fiers de constater que la science allemande y a pris une part essentielle. L'impulsion initiale qui est à l'origine de ce vaste mouvement se trouve évidemment dans l'extraordinaire

perfectionnement apporté aux méthodes de mesure ; perfectionnement en relation très étroite avec les progrès de la technique, qui a permis la découverte de faits nouveaux et obligé à reviser les théories existantes. Deux grandes idées nouvelles contribuent surtout à donner le ton à la physique nouvelle ; ce sont, d'une part la théorie de la relativité et, d'autre part, la théorie des quanta. Chacune a, pour sa part, contribué au bouleversement fécond des idées ; mais elles n'en sont pas moins demeurées totalement étrangères l'une à l'autre et même opposées, jusqu'à certain point.

Il y eut une époque où la théorie de la relativité était un sujet général de conversation. Partisans et adversaires s'affrontaient dans tous les milieux et on peut retrouver un écho de leurs discussions jusque dans la presse quotidienne, où quelques personnes compétentes et un bien plus grand nombre d'incompétentes développaient leurs arguments pour ou contre. Aujourd'hui les esprits ont retrouvé un peu de calme et personne n'en éprouve une satisfaction plus sincère que l'auteur de la théorie lui-même. Le grand public s'est blasé et la mode s'est emparée d'autres sujets de discussion. Il faudrait bien, cependant, se garder d'en conclure que la théorie de la relativité ne joue plus aucun rôle dans la science : c'est exactement le contraire qui est la vérité. La théorie est devenue une pièce tellement essentielle de la construction de l'univers, aux yeux de la physique moderne, qu'on éprouve de moins en moins le besoin de la mentionner. Il en est d'elle, comme de toutes les choses qui vont de soi. Et effectivement, à tout prendre, pour révolutionnaire qu'ait paru être la théorie de la

relativité au moment de son apparition, il n'en est pas moins vrai que les coups qu'elle a portés n'étaient nullement dirigés contre les grandes lois bien établies de la physique, mais contre certaines opinions profondément enracinées, il est vrai, par suite d'une longue habitude. Ces opinions, nous avons déjà essayé de le montrer à propos d'autres idées analogues, sont de celles qui ont été très utiles pour donner un premier aperçu des lois de la physique, mais qui doivent être éliminées ultérieurement quand il devient nécessaire d'approfondir et de généraliser.

La notion de simultanéité en est un exemple particulièrement instructif. Rien ne peut paraître plus évident à un observateur sans parti pris qu'il y a un sens bien défini à parler de la simultanéité de deux événements ayant lieu en des points éloignés l'un de l'autre. Pour tout le monde, c'est en effet un jeu que de parcourir instantanément par la pensée les plus grandes distances et de comparer par l'introspection les deux événements ainsi mis en contact direct. La théorie de la relativité, il faut insister là-dessus, n'a rien changé à cet état de choses. Tout observateur pourra, en l'utilisant en toute confiance, pourvu qu'il dispose d'instruments de mesure suffisamment exacts, déterminer si deux événements sont simultanés ou non. Quelle que soit la diversité des instruments et des méthodes dont il se servira pour mesurer le temps, s'il opère convenablement, il trouvera le même résultat. Tout reste donc comme devant.

Mais d’après la théorie de la relativité, il ne va pas de soi que les mêmes événements devront être regardés comme simultanés par un observateur en mouvement par rapport au premier, car la pensée et les intuitions d’un homme ne sont pas nécessairement la pensée et les intuitions d’un autre homme. Si les deux observateurs en viennent à échanger une explication sur leurs points de vue respectifs, chacun se référera à ses propres mesures et il en ressortira que pour l’interprétation des dites mesures, ils sont partis de suppositions tout à fait différentes. Mais parmi ces suppositions laquelle est exacte ? Il est aussi impossible de le savoir qu’il est impossible de savoir quel est l’observateur en mouvement et quel est celui qui est au repos. C’est là en définitive le point dont dépend tout le reste : car la marche d’une horloge subit, quand elle se meut, une modification dont il n’y a aucunement lieu de s’étonner et il en résulte que les deux horloges auront nécessairement une marche différente. La conclusion en est que chacun à tout autant que l’autre le droit de se prétendre au repos et que sa mesure du temps est exacte. Dans ces conditions, les événements tenus pour simultanés par un des observateurs ne le seront plus pour l’autre. Voilà certes un point de vue difficile à concilier avec le pouvoir représentatif de notre imagination. Mais le sacrifice qui est ainsi demandé à notre intuition est insignifiant et quasi nul si on le compare aux avantages inestimables qu’il a procurés, parce qu’il rend possible une synthèse de l’univers d’une simplicité et d’une amplitude vraiment grandioses.

Si quelqu’un ne pouvait, malgré tout, s’empêcher de soupçonner la théorie de la relativité de comporter quelque contradiction interne, nous lui ferions remarquer qu’une théorie dont tout le contenu peut tenir en une formule mathématique ne peut pas se contredire elle-même, pas plus que ne le peuvent deux conséquences de la même formule. C’est notre intuition qui doit se conformer aux résultats de la formule et non pas l’inverse.

En dernière analyse, l’expérience seule est capable d’établir la validité du principe de relativité et de renseigner sur son importance et nous ajouterons même que la possibilité, pour une théorie, d’être vérifiée par l’expérience est la marque la plus significative de sa fécondité. Or, malgré les bruits qui se sont répandus dans le grand public à ce sujet, jamais, jusqu’ici, l’expérience n’a infligé de démenti à la théorie de la relativité. Quoi qu’il en soit, d’ailleurs, si quelqu’un estimait qu’une telle contradiction est possible ou même probable, le mieux à faire, pour soutenir son opinion, serait encore de prêter son concours au développement de la théorie en la poussant jusqu’à ses dernières conséquences ; tel est l’unique moyen de faire apparaître une contradiction éventuelle entre elle et l’expérience. Le travail dont il s’agit serait d’autant plus aisé que la théorie ne comporte aucune équivoque, qu’elle est relativement claire et qu’elle s’adapte merveilleusement au cadre de la physique classique.

Bien plus, pour ma part, si je ne craignais de soulever des objections d’ordre historique, je n’hésiterais pas un instant à

faire rentrer la relativité dans la physique classique. C'est elle qui en a été dans une certaine mesure le couronnement par son unification, dans une synthèse supérieure, des notions d'espace et de temps, d'énergie et de gravitation. Cette synthèse est si parfaite que, grâce à elle, il a été possible de donner aux lois de la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement des formes parfaitement symétriques, en considérant ces deux lois comme deux conséquences équivalentes du principe de la moindre action devenu la loi la plus générale de la physique. Ce principe, dès lors, enveloppe à la fois le domaine de la mécanique et celui de l'électrodynamique.

L'hypothèse des quanta forme le contraste le plus saisissant qui soit avec cette merveilleuse harmonie, elle fait exactement l'effet d'un explosif menaçant introduit du dehors au milieu de l'édifice de la physique et déjà nous voyons que, témoignage inquiétant de sa puissance, une grande lézarde le traverse du haut en bas. L'hypothèse des quanta n'est pas née d'un seul coup à l'état adulte, comme la théorie de la relativité, elle ne s'est pas présentée tout d'abord comme un système d'idées simple et bien cohérent, destiné à apporter à certaines lois déjà connues de la physique des modifications très importantes en principe, bien qu'insignifiantes, en pratique, dans la plupart des cas. Elle a vu le jour dans un domaine tout à fait spécial de la physique : la théorie de la chaleur rayonnante, où elle est apparue comme étant l'unique moyen de salut. Plus tard, il s'est trouvé que des problèmes tout différents, comme l'effet photoélectrique, la chaleur spécifique, l'ionisation, les réactions chimiques, devenaient quelquefois d'une simplicité

enfantine et, en tout cas, beaucoup plus faciles à résoudre, l'hypothèse des quanta une fois admise. Aussi fut-on bientôt amené à faire de cette hypothèse, non plus un simple instrument de travail, mais un nouveau principe fondamental, trouvant son application partout où il s'agit de phénomènes très petits et très rapides.

Malheureusement, l'hypothèse des quanta ne se contente pas de contredire les idées anciennes généralement reçues : d'après ce qui vient d'être dit, ce serait là chose relativement supportable ; mais il apparaît de plus en plus qu'elle contredit les postulats les plus fondamentaux de la physique classique. Il ne s'agit donc pas d'une simple modification, comme dans le cas de la théorie de la relativité, mais d'une véritable subversion des idées.

Naturellement, rien ne pourrait s'opposer à un abandon de la théorie classique ; cet abandon deviendrait même nécessaire s'il était démontré que la théorie des quanta lui est supérieure ou même simplement équivalente sur tous les points. Or il n'en est absolument pas ainsi : il y a, en physique, des domaines, tel le vaste domaine des phénomènes d'interférence, où la théorie classique se trouve vérifiée par les mesures les plus précises jusque dans ses moindres détails et où l'hypothèse des quanta, du moins sous sa forme actuelle, échoue complètement et cela non point dans ce sens qu'elle ne serait pas applicable, mais bien en ce sens que les résultats qu'elle permet de prévoir ne concordent pas avec ce qui est constaté expérimentalement.

Aujourd’hui les choses en sont arrivées à un tel point que chacune des théories a, pour ainsi dire, son domaine particulier où elle se sent inattaquable. Il existe, en outre, des domaines intermédiaires, par exemple la dispersion et la diffraction de la lumière, où elles se combattent avec plus ou moins de succès, soit pour l’une, soit pour l’autre ; car elles conduisent à peu près aux mêmes conséquences. Un physicien pourra donc, suivant ses penchants personnels, s’appuyer tantôt sur l’une tantôt sur l’autre. Ceci ne va pas sans provoquer chez celui qui cherche sérieusement à se rendre compte de ce que sont les choses en réalité, un sentiment de gêne pénible et même insupportable à la longue.

Pour illustrer ce singulier état de choses, vous me permettrez de me borner à un seul exemple tiré du trésor surabondant des résultats expérimentaux et des considérations théoriques qui leurs sont relatives.

Je rappelle d’abord deux faits très simples. Imaginons deux faisceaux lumineux étroits obtenus en plaçant devant une source ponctuelle violette un écran percé de deux trous. Si ces deux faisceaux sont dirigés au moyen de miroirs, de façon à atteindre la même plage d’une paroi blanche éloignée, la tache lumineuse observée ne sera pas uniforme, elle sera parsemée de franges, tel est le premier fait. Le second est qu’un métal quelconque, sensible à la lumière, placé sur le parcours de l’un de ces rayons émettra continuellement des électrons dont la vitesse sera constante et tout à fait indépendante de l’intensité de la lumière qui frappe le métal.

Supposons maintenant que l’on fasse décroître de plus en plus l’intensité de la lumière : d’après toutes les expériences exécutées jusqu’ici, l’image des franges reste tout à fait invariable, l’intensité de leur éclairement, se bornant à devenir moindre. Dans l’autre cas, au contraire, la vitesse des électrons restera identique, seule la fréquence du bombardement sera moins grande. Voyons maintenant comment la théorie rend compte des deux faits. Le premier s’explique parfaitement au point de vue de la physique classique. En tout point de la paroi blanche qui est éclairé à la fois par les deux sources, les rayons lumineux se renforcent ou s’affaiblissent l’un l’autre, suivant la différence de marche existant entre les ondes lumineuses. Le second fait s’explique tout aussi facilement par la théorie des quanta. D’après cette théorie, l’énergie rayonnante ne frappe pas la surface du métal photo-sensible en un flux continu : cette énergie discontinue se présente sous la forme d’un nombre plus ou moins grand de quanta égaux et indivisibles et tout quantum incident provoque l’émission d’un électron. Par contre, tous les efforts tentés, soit pour expliquer les franges d’interférence par la théorie des quanta, soit pour ramener l’effet photo-électrique à la théorie classique, ont complètement échoué. En effet, si l’énergie rayonnante de la source lumineuse se compose de quanta indivisibles, un de ces quanta devra passer par l’un ou par l’autre des deux trous percés dans l’écran et, avec un éclairement suffisamment faible, il sera impossible que les deux rayons atteignent simultanément le même point de la paroi, il n’y aura donc pas d’interférence. Effectivement celles-

ci cessent complètement si l’on intercepte un des deux rayons lumineux.

D’autre part, si l’énergie émise par une source lumineuse ponctuelle se disperse d’une façon continue dans toutes les directions et dans un espace de plus en plus grand, sa densité ira forcément en diminuant de plus en plus et on ne voit pas comment un éclairement très faible peut provoquer une émission d’électrons ayant la même vitesse que dans le cas d’un éclairement très intense. Naturellement, les tentatives les plus diverses ont été faites pour surmonter cette difficulté. La première idée qui vient à l’esprit est de supposer que l’énergie des électrons projetés par le métal ne provient aucunement du rayonnement incident, mais de l’intérieur du métal, de telle sorte que le rayonnement n’a qu’une action de relai analogue à celle d’une étincelle qui fait détonner un tonneau de poudre. Malheureusement, on n’a pas réussi à déterminer quelle est la source d’énergie qui agit, ni même à en trouver une, simplement plausible. D’après une autre hypothèse, l’énergie cinétique des électrons provient du rayonnement incident ; mais cette énergie ne peut produire son effet que si l’éclairement à duré assez longtemps pour accumuler l’énergie nécessaire à la projection de l’électron avec une vitesse déterminée. Ce temps devrait donc varier de quelques minutes à plusieurs heures ; en fait, on trouve que l’émission de l’électron a lieu parfois beaucoup plus tôt.

On mesurera aisément la grandeur des difficultés à surmonter, si je dis que des voix très autorisées ont proposé récemment de

sacrifier le principe de la conservation de l’énergie, tentative que l’on peut bien qualifier de désespérée et qui s’est d’ailleurs révélée tout à fait inopérante, comme cela résulte d’expériences faites spécialement en relation avec elle.

Tous les essais faits dans le but d’expliquer l’émission électronique par la physique classique ont donc échoué alors que l’hypothèse des quanta y réussit parfaitement ; mais ce n’est pas là son seul triomphe. Il existe beaucoup d’autres lois relatives à une action mutuelle de la matière et du rayonnement qui deviennent très faciles à expliquer moyennant l’hypothèse de quanta qui se comportent comme de minuscules systèmes clos indépendants les uns des autres, comme de véritables atomes de substance dans leurs chocs avec la matière.

Comme il faut absolument adopter un point de vue ou l’autre, tout le problème revient à savoir si l’énergie rayonnée par la source se divise ultérieurement en deux parts, de telle façon qu’une partie passe par l’un des trous et l’autre par le second trou, ou bien si cette énergie formée de quantums indivisibles passe alternativement par un trou ou par l’autre. Cette question est inévitable, toute théorie quantique et même toute théorie, en général, doit prendre position vis-à-vis d’elle. Malheureusement aucun physicien n’a pu, jusqu’ici, y répondre d’une façon satisfaisante.

Cependant, convient-il de parler de l’énergie rayonnante comme de quelque chose de réel, étant donné que toutes les mesures d’énergie se rapportent toujours à des phénomènes ayant lieu dans des corps matériels ? On ne peut guère en

douter si on veut bien ne pas oublier que, pour maintenir le principe de la conservation de l'énergie (dont la validité a trouvé une confirmation supplémentaire dans les expériences récentes), il est nécessaire d'attribuer à tout champ où il y a un rayonnement une certaine quantité d'énergie bien déterminée et calculable avec plus ou moins d'exactitude. Cette énergie diminue s'il y a absorption et elle augmente s'il y a émission. La seule question qui se pose est de savoir comment cette énergie se comporte. Dès lors, il devient indubitable que pour échapper au terrible dilemme dont nous venons de parler, il faut bien se résoudre à apporter un certain assouplissement et une certaine généralisation aux tous premiers postulats de la physique, à ceux dont nous sommes habitués à faire le point de départ de tout : que nous tenons, de ce fait, comme intangibles. C'est là une nécessité inéluctable, malgré ce qu'elle a de peu satisfaisant, eu égard à notre besoin de connaissance.

Il y aurait bien un moyen de tout sauver, ce serait, sans aucun doute, de se débarrasser de l'hypothèse vulgaire selon laquelle l'énergie rayonnante est localisée de quelque façon, localisation en vertu de laquelle il y aurait, à un instant donné, dans une portion déterminée du champ électromagnétique, une quantité également déterminée d'énergie. Si on élimine cette hypothèse, il n'y a plus de problème, tout simplement parce que la question de savoir si un quantum lumineux a passé par un trou ou par l'autre n'a plus de sens physique. Toutefois, à mon avis, cette manière de voir comporte, du moins pour le moment, l'abandon de trop de choses. Nous savons, en effet, que prise en bloc l'énergie rayonnante a une valeur bien

déterminée et calculable ; de plus le champ électromagnétique vectoriel qui résulte d'un rayon peut être déterminé dans toutes ses particularités spatiales et temporelles, au moyen de l'électrodynamique classique et cela d'une façon qui concorde dans les moindres détails avec les faits, enfin l'énergie résulte du champ et disparaît avec lui. C'est pourquoi je vois difficilement comment on pourrait élucider la question suivante : étant donné telle portion de l'espace considérée à part, comment l'énergie y sera-t-elle déterminée par les caractéristiques du champ dans cette même portion ?

Cependant, si nous nous résolvons à tourner autant que possible la difficulté, la première idée qui vient à l'esprit pour échapper au dilemme est, tout en conservant des lois qui mettent en relation l'onde électromagnétique et l'énergie qu'elle transporte, de ne plus concevoir ces lois comme aussi rigides et aussi simples que dans la théorie classique. D'après cette dernière, à toute portion, si petite soit-elle, de l'onde électromagnétique, correspond une valeur de l'énergie proportionnelle à sa grandeur et se propageant avec elle. Si maintenant nous atténuons la rigueur de ce lien d'interdépendance, c'est-à-dire si nous admettons que l'énergie de l'onde ne lui est pas liée d'une façon aussi directe jusque dans ses parties les plus infimes, il deviendra possible que l'onde émise par une source se subdivise indéfiniment, tandis que l'énergie de cette même onde reste concentrée en certains points déterminés comme le veut la théorie des quanta. La première de ces circonstances permet d'expliquer les phénomènes d'interférences, car l'onde, même la plus faible, se

partagera entre les deux trous de l'écran ; la seconde circonstance permet d'expliquer l'effet photoélectrique, car l'onde ne projette son énergie sur les électrons qu'en quanta discrets.

Comment imaginer une certaine portion d'une onde lumineuse sans l'énergie correspondante ? Je n'ignore pas que c'est assez difficile. Mais l'est-ce davantage que de se représenter une partie d'un corps sans la densité de ce même corps ? Or, nous sommes contraints de faire une telle supposition, notamment en raison de ce fait que la matière perd ses qualités ordinaires quand on y pousse de plus en plus loin la subdivision. Sa masse cesse d'être proportionnelle au volume qu'elle occupe, car elle se résout en un certain nombre de molécules discrètes. Il pourrait en être tout à fait de même de l'énergie électromagnétique et de la quantité de mouvement qui y est associée.

Jusqu'ici, on avait coutume de chercher les lois élémentaires de l'électrodynamique dans le domaine de l'infiniment petit. On partageait tout le champ en parties infiniment petites selon l'espace et selon le temps. Les lois qui exprimaient le comportement général de ce champ avaient donc la forme d'équations différentielles. Actuellement, semble-t-il, cette manière de procéder doit être modifiée de fond en comble. Il est, en effet, avéré que les lois à forme simple obtenues de cette manière cessent d'être valables à partir d'un certain degré de subdivision, car pour les phénomènes intéressant des domaines plus petits, il se produit une certaine complication. Les

changements qui interviennent alors nous contraignent à introduire la notion d'une certaine atomisation des grandeurs d'action spatio-temporelles, à émettre par conséquent l'hypothèse d'atomes d'action.

L'élaboration toute récente de la mécanique des quanta par les physiciens de l'école de Gottingue, Heisenberg, Born et Jordan est, en ce sens, un progrès dont il est permis d'espérer beaucoup. La nouvelle mécanique a déjà de beaux succès à son actif. Cependant il appartient à l'avenir de montrer dans quelle mesure les idées nouvelles permettront d'approcher davantage de la solution de notre problème.

Les plus belles théories mathématiques ne sont, en effet, que spéculations en l'air, tant qu'elles n'ont point trouvé un point d'appui solide dans les constatations de l'expérience. L'art du physicien expérimentateur, qui a déjà levé tant de doutes dans les questions les plus délicates, apportera aussi, il faut l'espérer, sa lumière dans ce canton si obscur de la science. Quand cela aura eu lieu, une partie de l'édifice de la physique classique aura été ruinée de fond en comble, sous les coups de la théorie des quanta et il sera remplacé par une construction plus parfaite et plus solide.

Ainsi donc, la physique, comme nous venons de le voir, considérée par la génération précédente comme une des plus vieilles et des plus solidement assises parmi les connaissances humaines, est entrée dans une période d'agitation révolutionnaire qui promet d'être une des plus intéressantes de son histoire. Quand on aura surmonté les causes du trouble

actuel, on s'apercevra qu'il aura, non seulement contribué à la découverte de phénomènes nouveaux, mais encore que, grâce à lui, des pistes toutes nouvelles auront indubitablement été ouvertes pour l'exploration des mystères de la théorie de la connaissance. Il se peut même que, dans ce domaine, nous devions nous attendre à bien des surprises et nous pourrions voir certaines idées, aujourd'hui vieillies et tombées dans l'oubli, retrouver une importance nouvelle. Pour cette raison, il serait souhaitable que les idées et les intuitions de nos grands philosophes fussent étudiées avec attention.

Les temps où la philosophie et les sciences positives se considéraient comme étrangères l'une à l'autre et se regardaient mutuellement avec méfiance doivent être considérés comme révolus. D'une part, en effet, les philosophes se sont bien rendus compte qu'il ne leur appartient pas de tracer leur ligne de conduite aux savants, soit pour leur indiquer les buts qu'ils doivent poursuivre, soit pour leur proposer les méthodes dont ils doivent user ; et, d'autre part, les savants ont parfaitement compris que le point de départ de leurs recherches ne réside pas seulement dans les perceptions sensibles et que, même aux sciences positives, une certaine dose de métaphysique est indispensable. Il est une très vieille vérité que la physique moderne se charge de mettre en une singulière évidence, c'est qu'il y a des réalités pleinement indépendantes de nos sensations et qu'il y a des problèmes et des sujets de controverses, où ces réalités valent davantage que les plus riches trésors tirés de l'univers tel que nos sens l'appréhendent.

CHAPITRE VIII

L'UNIVERS TEL QU'IL EST AUX YEUX DE LA PHYSIQUE MODERNE

En essayant de retracer l'histoire de l'évolution des idées concernant l'univers depuis une vingtaine d'années, je suis pleinement conscient que je ne puis avoir la prétention d'être complet. Je m'y résigne, il est vrai, en pensant que cette tâche est devenue singulièrement difficile. Les problèmes qui se sont posés mettent en effet en cause l'intégralité de notre capacité de connaissance en physique et cela à un point tel qu'on ne l'eût jamais jugé possible autrefois. Je crois donc indispensable, dans un but de clarté, de partir de considérations assez lointaines, dussè-je m'exposer à redire inutilement des choses connues depuis longtemps.

I

La science physique, tout entière, est un édifice à la base duquel on trouve les mesures. Or toute mesure étant liée à une perception sensible, toute loi physique concerne, au fond, des événements ayant lieu dans le monde sensible ; c'est pourquoi un certain nombre de savants et de philosophes sont portés à penser, qu'en dernière analyse, les physiciens n'ont affaire

qu’au monde sensible, et même au monde tel qu’il est perçu par les sens humains. Par exemple, un « objet » au point de vue physique, ne sera pas autre chose qu’un complexe de diverses sensations convergentes. Nous ne saurions jamais trop y insister, il n’existe pas de motif logique permettant de réfuter cette opinion ; car la logique seule ne peut faire sortir qui que ce soit du monde sensible ; elle est même incapable de nous contraindre à admettre l’existence d’autres hommes que nous-mêmes. Mais elle n’est pas seule à assurer le gouvernement de notre entendement, il y faut aussi la raison. Or pour qu’une chose soit raisonnable, il ne suffit pas qu’elle ne comporte aucune contradiction logique. La raison nous dit que si nous tournons le dos à un objet en nous éloignant de lui, il en reste encore quelque chose quand nous ne sommes plus là. La raison nous dit encore qu’un seul homme, que l’humanité tout entière avec tout son univers de sensations, que notre système planétaire lui-même, ne sont qu’un tout petit rien, une partie infime de la nature sublime et incompréhensible. La raison nous dit que les lois de la nature ne surgissent pas d’un pauvre cerveau humain, qu’elles ont existé avant que la vie soit apparue sur la terre et qu’elles existeront encore quand le dernier physicien aura disparu.

Ces pensées, qui ne sont pas des conclusions logiques, nous obligent à admettre l’existence d’un monde réel derrière le monde de nos sensations, monde dont l’existence est indépendante de l’homme. Nous ne pouvons acquérir aucune connaissance directe de ce monde, nous pouvons seulement en prendre conscience par l’intermédiaire du monde de nos

sensations. S’il y a des gens qui ne peuvent se résigner à adopter cette manière de voir et qui ne peuvent envisager l’existence d’un monde réel, inconnaissable par principe, nous leur ferons observer que, se trouver en présence d’une théorie physique toute achevée dont on peut analyser exactement le contenu et établir que des concepts pris dans le monde sensible suffisent parfaitement à la formuler, est une chose et, qu’édifier une théorie physique en prenant son point de départ dans un ensemble de mesures particulières est une tout autre chose. L’histoire de la physique nous montre combien cette seconde tâche est incomparablement plus difficile que la première. Jusqu’ici, on n’a pas pu réussir à la mener à bien sans admettre l’existence d’un monde réel indépendant de nos sens humains et, d’autre part, il n’y a pas de raison de penser qu’il en sera autrement à l’avenir.

Le monde étudié par les physiciens est un troisième monde qu’il convient de distinguer et du monde réel et du monde sensible. Ce monde, contrairement aux deux premiers, est une création consciente de l’esprit humain, faite dans un but déterminé, elle est donc sujette à des transformations et susceptible de progrès. Le rôle du monde des physiciens est double : on peut, en effet, le considérer par rapport au monde réel ou par rapport au monde des sensations. Dans le premier cas, sa raison d’être sera de donner du monde réel une connaissance aussi complète que possible ; dans le second, de décrire aussi simplement que possible le monde sensible. Il serait d’ailleurs oiseux de vouloir attribuer une priorité à l’un quelconque de ces deux rôles. Chacun d’eux, pris isolément,

n’est que partiel et ne peut être regardé comme pleinement satisfaisant ; car, d’une part, il est impossible d’avoir une connaissance directe du monde réel et, d’autre part, on ne saurait donner une règle qui permette, étant données deux descriptions d’un ensemble cohérent de perceptions, de déterminer quelle est la-plus simple. Il est en effet arrivé plus d’une fois dans l’histoire de la physique qu’une description jugée tout d’abord plus compliquée qu’une autre, s’est trouvée être ultérieurement considérée comme la plus simple.

En tout cas, la seule chose qui importe, c’est que ces deux conceptions du rôle de la physique ne se contredisent pas en pratique, mais qu’elles se complètent, au contraire, de la plus heureuse des façons. La première manière d’envisager la physique est fort utile au savant pour guider les tâtonnements de son imagination toujours en quête des idées fécondes indispensables à son travail ; la seconde le maintiendra sur le terrain solide des faits. Il y a d’ailleurs des physiciens qui ont une tournure d’esprit métaphysique et d’autres qui inclineront davantage vers le positivisme ; leur contribution à l’étude du système de l’univers portera donc la marque de l’une ou l’autre de ces deux tendances.

Ici nous devons dire un mot d’une troisième catégorie de travailleurs qui contribue, elle aussi, à édifier l’univers des physiciens : elle est constituée par les axiomatistes. Leur intérêt principal ne se portera, ni sur les relations de la physique avec le monde réel, ni sur ses relations avec le monde sensible, mais sur la structure intime des différentes parties de l’édifice et sur

le lien logique qu’elles ont entre elles. L’activité des axiomatistes est donc une activité utile et même nécessaire, mais elle n’est pas sans comporter un danger latent : l’esprit de système développé jusqu’à la partialité qui pourrait arriver à faire perdre de vue le véritable sens des idées physiques sur l’univers et à faire dégénérer cette science en un vain formalisme. Supposons, en effet, tout lien rompu avec la réalité : une loi physique n’est plus une relation entre grandeurs qui sont mesurées indépendamment les unes des autres, ce n’est plus qu’une définition en vertu de laquelle une de ces grandeurs est ramenée à l’ensemble des autres. Cette transformation du caractère des lois physiques est certes très tentante, car il est beaucoup plus précis de définir une grandeur physique par une équation que par une mesure ; il n’en est pas moins vrai qu’elle suppose que l’on renonce à donner une signification propre à cette grandeur. D’autre part, il y a aussi cette circonstance aggravante que, dans le cas où cette grandeur conserve son ancien nom, cela peut facilement être la source de confusions et de malentendus.

Nous voyons comment des esprits divers travaillent à l’édification de l’univers des physiciens et comment les points de vue auxquels ils se placent sont différents. Leurs efforts tendent, tantôt à rattacher ensemble les phénomènes du monde physique, tantôt à les mettre en dépendance de lois dont la cause est dans le monde réel. Suivant les époques, l’une ou l’autre des deux tendances sera prépondérante.

Aux époques où le système physique de l’univers a un certain caractère de stabilité (ce fut le cas dans la seconde moitié du siècle dernier), c’est la tendance métaphysique qui prévaut ; on se croit alors relativement près de pénétrer la constitution du monde réel. Par contre aux époques où, comme de notre temps, tout est en voie de transformation et paraît incertain, on est plus généralement favorable au positivisme. Le savant consciencieux se sent, en effet, davantage porté à revenir au seul point de départ solide : les phénomènes du monde sensible.

Faisons maintenant l’historique des différents systèmes de l’univers et voyons comment ils se sont transformés les uns dans les autres, en tâchant de faire sortir le trait caractéristique de cette évolution.

Deux faits nous apparaissent particulièrement significatifs : le premier est qu’on peut constater que toutes ces transformations se suivent, en gros, non point en obéissant à un rythme d’oscillations périodiques, mais qu’elles progressent plus ou moins rapidement toujours dans la même direction. Le sens de cette évolution peut être caractérisé en disant que le contenu de notre monde sensible devient de plus en plus riche, que nous en avons une connaissance de plus en plus approfondie et enfin que nous possédons sur ce monde une maîtrise de plus en plus grande. Un regard jeté sur les applications pratiques de la physique suffira à nous convaincre que telle est bien la vérité. Il n’est pas de sceptique assez endurci pour douter qu’aujourd’hui nous puissions voir et entendre à des distances

beaucoup plus considérables que jadis ; nous disposons aussi de forces et de vitesses beaucoup plus grandes. Ce progrès, indiscutable, constitue un enrichissement permanent du trésor de nos connaissances, qu'on ne pourra jamais plus tard renier ni considérer comme un faux pas.

Le second fait caractéristique, c'est que, bien qu'il y ait toujours des observations nouvelles à l'origine de tout perfectionnement et de toute simplification apportés au système de l'univers, ce système n'en présente pas moins (et ceci est tout à fait remarquable) une structure qui s'éloigne de plus en plus du monde sensible. Les sensations en sont éliminées de plus en plus et il perd, dans la même mesure, son caractère anthropomorphique primitif. Comme exemple à l'appui, je me contenterai de citer ici l'optique physique où il n'est absolument plus question de l'œil humain. Les considérations abstraites y tiennent une place de plus en plus grande et le rôle des opérations formelles à caractère mathématique y est de plus en plus important, tandis que les différences qualitatives y sont ramenées à des différences quantitatives.

Rapprochons maintenant le second fait du premier, c'est-à-dire de la perfection de plus en plus grande de la physique eu égard à ce qui concerne ses rapports avec le monde sensible. Nous nous trouvons en présence d'un état de choses qui a toutes les apparences d'un paradoxe dont je ne vois qu'une explication raisonnable, c'est que le mouvement en vertu duquel le système physique de l'univers s'éloigne de plus en plus du

monde sensible, au fur et à mesure de son perfectionnement, est aussi un mouvement d'approche de plus en plus serré vers le monde réel. Je ne saurais évidemment donner de bases logiques à une telle opinion, puisqu'il n'existe même pas de preuve purement logique de l'existence du mondée réel ; mais j'ajouterai qu'inversement il n'est pas davantage possible de réfuter mon opinion par la seule logique.

Pour trancher la question, il n'y a qu'à se faire une idée raisonnable de l'univers et, à ce point de vue, l'antique vérité, suivant laquelle la meilleure conception de l'univers est celle qui porte le plus de fruits restera toujours notre meilleur guide. Parmi toutes les sciences, la physique serait une exception unique si elle ne suivait pas la loi d'après laquelle les résultats les plus sérieux et les plus féconds du travail scientifique sont obtenus, en poursuivant toujours le but, pourtant inaccessible, de connaître la réalité telle qu'elle est en soi.

II

Quelles sont les transformations subies par le système de l'univers pendant ces vingt dernières années ? Tout le monde sait que les changements intervenus sont parmi les plus profonds qui aient jamais été enregistrés dans l'histoire de l'évolution d'une science, on sait également que la transformation n'est pas encore tout à fait à son terme. Cependant, dès maintenant, il y a certaines formes caractéristiques de la structure du nouvel univers qui émergent

des flots et cela vaut la peine d’essayer de les décrire, ne serait-ce que pour provoquer une tentative d’amélioration.

Si nous comparons l’ancien univers et le nouveau, nous nous apercevons tout de suite qu’un nouveau et très grand pas a été fait dans le sens de la réduction des différences qualitatives à des différences quantitatives. Nous voyons, par exemple, la diversité si grande des phénomènes électriques ramenée entièrement à des relations numériques et spatiales. Selon les conceptions nouvelles, il n’y a que deux matières primordiales : l’électricité positive et l’électricité négative. Toutes deux consistent en particules infimes de même nature et de charge opposée. La particule positive s’appelle proton et la particule négative électron. Tout atome électriquement neutre se compose d’un certain nombre de protons solidement attachés les uns aux autres et d’un nombre égal d’électrons. Une partie de ces électrons est fortement liée aux protons, elle forme avec eux le noyau atomique, les autres électrons tournent autour du noyau atomique.

Ainsi le plus petit atome, celui de l’hydrogène, se compose d’un seul proton et d’un seul électron qui gravite autour de ce proton et le plus grand atome, celui de l’uranium, se compose de 238 protons et d’autant d’électrons, mais il n’y en a que 92 à se mouvoir autour du noyau, les autres y étant inclus. Entre ces deux atomes, se trouvent ceux de tous les autres éléments qui présentent toutes les combinaisons possibles de protons et d’électrons. La nature chimique d’un élément n’est pas déterminée par le nombre total de ses protons et de ses

électrons, mais par le seul nombre de ses électrons mobiles ; c'est ce qu'on appelle le nombre atomique.

En dehors de ce progrès important qui est, au fond, l'aboutissement heureux d'idées déjà vieilles de plusieurs siècles, il existe deux idées absolument nouvelles qui distinguent le système physique actuel de l'univers de l'ancien et lui donnent son aspect essentiel le plus caractéristique, ce sont : le principe de relativité et le principe des quanta. Jusqu'à un certain point, on peut considérer comme fortuit le fait que ces deux idées soient apparues en même temps. En effet, aussi bien par leur contenu que par leur effet pratique, à tout égard, sur la constitution interne du système physique de l'univers, elles se sont comportées d'une manière toute différente.

La théorie de la relativité, bien qu'elle ait commencé par jeter un certain trouble dans les notions traditionnelles de temps et d'espace s'est, en fin de compte, comportée comme le couronnement de l'édifice de la physique classique. Si nous avions à caractériser en un mot le contenu positif de cette théorie, nous dirions qu'elle consiste en une fusion des deux notions de temps et d'espace en un concept unitaire, non pas en ce sens que le temps et l'espace y seraient regardés comme tout à fait équivalents, mais en ce sens que leur union serait un peu celle qui lie un nombre réel à un nombre imaginaire pour former un nombre complexe. À cet égard, la théorie de la relativité est à la physique moderne ce que l'œuvre de Gauss fut, au siècle dernier, pour les mathématiques.

Nous pourrions même pousser cette comparaison plus loin, en remarquant qu'en physique le passage de la relativité spéciale à la relativité généralisée est analogue à ce qu'est en mathématique le passage de la théorie des fonctions linéaires à la théorie générale des fonctions.

Sans doute, cette comparaison est un peu boiteuse, comme toutes les autres, elle est cependant une image exacte du fait que l'introduction de la théorie de la relativité dans l'image représentative physique de l'univers a été une des étapes les plus importantes de la route de la physique vers son unification parfaite. Ceci ressort des conséquences que cette introduction a entraînées : tout d'abord l'assimilation de l'énergie à la quantité de mouvement, ensuite la réduction du concept de masse à celui d'énergie, entrainant l'identification de la masse pondérable à la masse, coefficient d'inertie ; et enfin, la réduction des lois de la gravitation à la géométrie de Riemann.

Si courts que puissent être de pareils aphorismes, il n'en est pas moins vrai que leur contenu est pour ainsi dire inépuisable. Leur importance s'étend à tous les phénomènes naturels, des plus grands aux plus petits. Ils s'appliquent aux atomes radioactifs qui émettent des ondes et des corpuscules et aux mouvements des corps célestes dont nous séparent des millions d'années de lumière.

L'édification de la théorie de la relativité n'est pas encore complètement terminée et il ne semble pas que le dernier mot ait été dit à son sujet. On sait que le problème de l'unification de l'électrodynamique et de la mécanique n'a pas encore reçu

de solution définitive et cela donne à penser que l'avenir pourrait nous réserver quelques surprises. Les conséquences cosmologiques de la théorie de la relativité ne sont pas non plus tirées au clair ; elles dépendent en effet de la question, non encore tranchée, de savoir si la densité de répartition de la matière répandue dans l'univers doit être considérée comme finie ou comme infinie. En tout cas, quelle que soit la solution qui sera apportée au problème, il est d'ores et déjà acquis que le principe de relativité a porté la physique classique à son plus haut point de perfection et que l'image représentative de l'univers qui est son œuvre est, au point de vue formel, d'une cohérence particulièrement satisfaisante. En conséquence, je me crois autorisé à ne pas m'arrêter davantage à la théorie de la relativité. Je me bornerai à inviter le lecteur à se reporter aux nombreux ouvrages qui existent sur ce sujet. Quelle que soit sa formation scientifique, il en trouvera qui sont à sa portée.

III

Tel un phare dont la lumière serait trop éblouissante, l'hypothèse des quanta est venue d'une façon tout à fait inattendue bouleverser toute cette belle harmonie et porter le trouble dans une conception de l'univers qui semblait presque idéalement parfaite. Si nous cherchons à caractériser en deux mots l'idée directrice qui est à la base de cette hypothèse, nous dirons qu'elle consiste dans l'introduction d'une nouvelle constante universelle : le quantum d'action élémentaire. Cette constante, dans laquelle il faut voir un nouveau messager mystérieux venu du monde réel, nous contraint, avec une

insistance de plus en plus obstinée, à lui faire une place en physique. Elle est pourtant si peu adaptée au cadre de l'ancien système de l'univers que son introduction dans la place a fini par faire sauter tous ces cadres qui se sont trouvés être trop étroits.

Il y eut une époque où il sembla qu'une faillite totale de la physique classique n'était pas en dehors du domaine des possibilités. Cependant, peu à peu (et cela ne pouvait faire de doute pour quiconque croit au progrès continuel de la science), on s'aperçut qu'il ne s'agissait pas d'une destruction, mais d'un remaniement, à vrai dire, très profond, dans le sens d'une généralisation. En effet, si l'on suppose que le quantum d'action est infiniment petit, la physique des quanta se transforme en la physique classique et, d'autre part, les pierres fondamentales de l'édifice constitué par cette dernière, non seulement demeurent inébranlables, mais encore se trouvent être cimentées plus solidement que jamais par l'apport des idées nouvelles. Nous allons examiner maintenant ces idées de plus près.

Les constantes universelles, comme la constante de la gravitation, la vitesse de la lumière, la masse et la charge des électrons et des protons qui sont bien les signes les plus manifestes du monde réel, conservent leur signification dans la conception nouvelle de l'univers. De plus, les grands principes de la conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement, bien qu'ils aient été récemment mis en doute, ont été confirmés pleinement, jusque dans leurs moindres détails, ce qui prouve,

soit dit en passant, que ces principes ne sont pas de simples définitions comme certains axiomatistes le prétendaient. De même, les principes de la thermodynamique, le second en particulier, ont été précisés encore davantage, puisque l'entropie a acquis une valeur absolue. Enfin, la relativité s'est montrée un guide très sûr pour l'exploration du domaine de la physique des quanta.

On sera donc tenté de dire : si tous ces fondements de la physique classique sont demeurés intacts : qu'est-ce donc qui a changé du fait de l'apparition de la nouvelle physique ? La réponse à cette question nous sera apportée très simplement si nous examinons ce que signifie la notion de quantum élémentaire d'action. Cette notion se réduit en définitive à poser en principe l'équivalence d'une énergie et d'une fréquence vibratoire : $E = h\nu$. Or cette équivalence n'a aucun sens du point de vue de la théorie classique. Tout d'abord, il saute aux yeux qu'une énergie et une fréquence vibratoire ont des dimensions différentes, l'énergie est en effet une grandeur dynamique et la fréquence vibratoire une grandeur cinématique. Cependant l'objection n'est peut-être pas tout à fait décisive ; car si, par le postulat quantique, la dynamique est rattachée d'une façon immédiate à la cinématique et, par voie de conséquence, la masse ramenée à la longueur et au temps, il n'y a plus de contradiction, mais seulement un élargissement et un enrichissement de la physique classique. Mais il y a autre chose, qui est incompatible avec la théorie ancienne. Une fréquence vibratoire, étant une grandeur locale, possède par là même une valeur absolument déterminée en un lieu donné.

Qu’il s’agisse d’une fréquence mécanique ou d’une fréquence électromagnétique, il suffit, pour cette détermination, de considérer pendant un temps suffisant le lieu en question. L’énergie, par contre, est une grandeur additive et, au point de vue de la théorie classique, il n’y a aucun sens à parler d’une énergie en un lieu donné. Si on me donne une énergie, on doit d’abord indiquer le système physique auquel elle se rapporte, de même que pour un mouvement, on doit indiquer le système de référence auquel il se rapporte, avant de pouvoir parler de sa vitesse. Comme le système physique peut être arbitrairement choisi, qu’il peut être grand ou petit, il y a toujours un certain arbitraire inévitable dans la détermination de l’énergie. Et c’est cette énergie arbitraire jusqu’à un certain point que l’on veut égaler à une fréquence vibratoire localisée. On voit l’abîme qui sépare les deux notions, pour le combler, il faut une démarche essentielle et inévitable et c’est cette démarche qui constitue effectivement une rupture avec certaines considérations tenues pour évidentes et intuitives par la physique classique.

En physique classique tout mode de raisonnement causal supposait, jusqu’à présent, le postulat suivant : Tous les phénomènes de l’univers (j’entends ici parler de l’univers des physiciens et non du monde réel) peuvent être décrits comme formés par la juxtaposition de phénomènes locaux ayant lieu dans des domaines élémentaires distincts infiniment petits et tout phénomène, situé dans un domaine élémentaire, est déterminé par ce qui se passe dans son voisinage immédiat, tant au point de vue spatial qu’au point de vue temporel. Citons un exemple concret pour faciliter la compréhension : Soit un

système physique constitué par des points matériels se mouvant dans un champ de force invariable de telle façon que son énergie totale demeure constante. D'après la physique classique, tous ces points possèdent une position et une vitesse déterminées et le mouvement de chaque point pourra se calculer exactement si l'on connaît son état initial et les caractéristiques locales du champ aux endroits où son mouvement l'amènera à passer. Ces caractéristiques, une fois connues, il n'est plus nécessaire de rien savoir au sujet des autres propriétés du système de points.

Dans la mécanique nouvelle il en est tout autrement, les caractéristiques locales y suffisent aussi peu à déterminer les lois d'un mouvement que l'observation microscopique de toutes les parties d'un tableau à donner une idée de l'ensemble. Pour arriver à trouver une loi valable il faut bien plutôt considérer le système physique comme un tout. Aussi la nouvelle mécanique considère que tout point du système se trouve, à tout instant, dans tout l'espace qui est mis à sa disposition et cela, non pas seulement en ce qui concerne le champ émanant de ce point et qui rayonne autour de lui, mais encore en ce qui concerne sa masse et sa charge électrique. On le voit, ce qui est en question, ce n'est rien moins que la notion de point matériel, la plus élémentaire de toutes les notions de la mécanique. La position centrale tenue par cette notion doit donc être abandonnée pour des raisons de principe, elle ne pourra subsister que dans certains cas limites. Que va-t-on substituer à cette notion, c'est ce qui ressortira de considérations qui seront le développement de ce qui vient

d’être dit. Si le postulat quantique de l’équivalence d’une énergie et d’une fréquence doit avoir un sens univoque, c’est-à-dire indépendant du système de référence d’après le principe de relativité, le vecteur quantité de mouvement doit aussi être équivalent au vecteur fréquence et par suite la valeur absolue de la quantité de mouvement est égale à l’inverse d’une longueur d’onde dont la normale coïncide avec la direction de l’impulsion. Mais, ici il ne faut imaginer aucune onde dans l’espace ordinaire à trois dimensions, l’onde dont il s’agit se situe dans ce que l’on appelle l’espace configuratif dont le nombre de dimensions est celui des degrés de liberté du système. Sa valeur est le double de l’énergie cinétique ou, ce qui revient au même, le carré de la quantité de mouvement totale. Ainsi donc la longueur d’onde est ramenée à l’énergie cinétique, c’est-à-dire à la différence entre l’énergie totale constante et l’énergie potentielle qui est une fonction locale déterminée à l’avance.

Si l’on multiplie la fréquence par la longueur d’onde, on obtient la vitesse de propagation ou vitesse de phase d’une certaine onde dans l’espace de configuration. Cette onde reçoit le nom d’onde matérielle et la substitution des valeurs correspondantes dans l’équation des ondes, telle que la fait connaître la mécanique classique, conduit à l’équation aux dérivées partielles homogène de Schrödinger. Cette équation est le fondement de la mécanique nouvelle, où elle joue le même rôle que les équations de Newton, de Lagrange et de Hamilton dans la mécanique classique. La principale différence entre l’équation de Schrödinger et ces équations consiste en ce

que les coordonnées du point de configuration ne sont plus des fonctions du temps, mais des variables indépendantes. C'est pourquoi, pour un système donné, au lieu d'avoir, comme dans la mécanique classique, un certain nombre d'équations correspondant au nombre plus ou moins grand des degrés de liberté du système, il n'y a plus qu'une seule équation quantique. Alors que le point configuratif de la théorie classique décrit en fonction du temps une courbe déterminée, le point configuratif de l'onde matérielle remplit à chaque instant un espace infini où il y a même des points tels que l'énergie potentielle y est plus grande que l'énergie totale. Dans la théorie classique ceci équivaudrait à dire que l'énergie cinétique y est négative et la quantité de mouvement imaginaire. Ce cas est tout à fait analogue au cas de la réflexion totale de la lumière. D'après l'optique géométrique, la lumière est véritablement réfléchie en totalité ; mais d'après l'optique ondulatoire, il y a également de la lumière qui pénètre dans le second milieu, mais ce n'est plus sous la forme d'ondes planes. D'ailleurs, le cas des points de l'espace configuratif caractérisés par une énergie potentielle supérieure à l'énergie totale est très important en mécanique quantique. Dans ce cas, le calcul montre, en effet, que, à toute valeur des constantes de l'énergie choisie arbitrairement, il ne correspond pas une onde finie, mais seulement à certaines de ces valeurs dites valeurs propres de l'énergie. Ces valeurs peuvent se déduire de l'équation d'onde. Elles sont diverses suivant la structure de l'énergie potentielle.

De ces valeurs discontinues de l’énergie, le postulat quantique permet de déduire des valeurs, également discontinues, de la période vibratoire. Ceci est analogue au cas d’une corde dont les extrémités sont fixes. La seule différence est que, dans le cas de la corde, la quantification est déterminée par une circonstance extérieure, la longueur d’onde : tandis que dans le cas de la mécanique ondulatoire, elle est conditionnée par le quantum d’action qui fait lui-même partie intégrante de l’équation différentielle. À toute vibration propre correspond, comme solution de l’équation d’onde, une fonction d’onde spéciale ψ et ce sont ces fonctions qui constituent les éléments de toute description de mouvement en mécanique quantique.

Le résultat est le suivant : En physique classique, on procède par subdivision du domaine à étudier en ses parties les plus petites et l’on ramène ainsi le mouvement d’un corps matériel quelconque au mouvement de ses points matériels supposés distincts et invariables, ce qui revient à faire une mécanique corpusculaire. En physique quantique on décompose tout mouvement en ondes matérielles élémentaires de périodes différentes qui correspondent aux vibrations et aux fonctions propres du système considéré, ainsi donc l’étude du mouvement est ramenée à une mécanique ondulatoire. D’après la mécanique classique, le mouvement le plus simple est celui d’un point matériel unique ; en mécanique ondulatoire, c’est celui d’une onde simplement périodique et, de même que suivant les idées anciennes, le mouvement le plus général d’un corps est la résultante de l’ensemble des mouvements de ses points matériels ; de même, d’après la théorie nouvelle, ce

mouvement sera la résultante de toutes les sortes d’ondes matérielles possibles.

La diversité de ces deux points de vue peut s’illustrer à l’aide de l’exemple d’une corde vibrante. D’une part, on peut considérer comme élément du phénomène le mouvement de chacun des points de la corde. Toute particule se meut alors indépendamment des autres, sous l’action d’une force déterminée par la courbure de la corde au point considéré. D’autre part aussi on peut considérer la vibration fondamentale de la corde et ses harmoniques ; chacune de ces vibrations intéresse la corde tout entière et leur ensemble détermine également son mouvement dans le cas le plus général.

La mécanique ondulatoire a permis aussi d’expliquer un fait resté jusqu’à présent très mystérieux. D’après la théorie extrêmement féconde de Niels Bohr, les électrons entourant le noyau atomique se meuvent autour de ce noyau suivant des lois tout à fait analogues aux lois du mouvement d’une planète autour du soleil. À cet égard, l’attraction des charges opposées du noyau et des électrons joue le rôle de la force de gravitation. Il y a cependant une différence bien étrange : les électrons ne peuvent se mouvoir que sur certaines trajectoires formant une série discontinue. Pour les trajectoires planétaires, au contraire, il n’existe pas d’orbites privilégiées.

Cet état de choses, au premier abord tout à fait incompréhensible s’explique très bien par la théorie ondulatoire des électrons. En effet, si un circuit électronique peut se former, il est clair qu’il doit toujours embrasser un

nombre entier de longueurs d’onde, de même qu’une chaîne fermée, composée de chaînons identiques, comprend toujours un nombre entier de ces chaînons. C’est pourquoi la révolution d’un électron autour d’un noyau atomique ressemble moins au mouvement d’une planète autour du soleil qu’à la rotation sur lui-même d’un anneau parfaitement symétrique. Cette rotation a lieu de telle sorte que l’anneau pris comme un tout occupe toujours la même position dans l’espace et c’est pourquoi, aussi, il n’y a aucun sens physique à parler de la position d’un électron à un instant donné.

Abordons maintenant la question de la description, en mécanique ondulatoire, du mouvement d’un seul point matériel. Nous remarquerons tout de suite, qu’à parler strictement, cette description n’est pas possible. En effet, pour définir la position d’un point matériel ou, plus généralement celle d’un point dans l’espace de configuration, il n’y a, en mécanique ondulatoire, qu’un seul moyen, c’est de superposer un train d’ondes propres du système considéré, de telle façon que les fonctions ondulatoires correspondantes s’annulent partout par interférence dans l’espace de configuration, sauf en ce point où elles se renforcent. La probabilité d’existence de tous les autres points sera nulle et celle du point singulier égale à l’unité. Mais pour que l’on arrive à un point défini d’une façon absolument nette, les longueurs d’onde devraient être infiniment petites et des quantités de mouvement infiniment grandes seraient nécessaires. Pour avoir un résultat, au moins approximatif, on est donc forcé de remplacer le point de l’espace configuratif par un domaine fini quoique petit qui sera

ce que l’on appelle un paquet d’ondes et la conséquence de tout cela sera que la position d’un point dans l’espace configuratif est toujours affectée d’une certaine incertitude en mécanique ondulatoire. Si, après avoir obtenu une certaine configuration, on désire attribuer une valeur définie à la quantité de mouvement d’un système de points, il faudrait, si l’on applique le postulat quantique, n’utiliser qu’une seule onde de longueur bien définie et la description du mouvement devient encore impossible ; mais si l’on consent à laisser une certaine indétermination à l’impulsion, on peut quelquefois arriver à serrer le but avec une certaine approximation en n’utilisant que des ondes comprises dans un domaine de fréquence très étroit.

Ainsi donc, tout comme la position, la quantité de mouvement ne peut être déterminée avec précision en mécanique quantique. Entre les incertitudes inhérentes à ces grandeurs, il existe une certaine relation que l’on pourra calculer en faisant simplement remarquer que, malgré leur faible différence de fréquence, les ondes utilisées dont l’extinction mutuelle par interférence a lieu en dehors d’un petit domaine de l’espace configuratif, possèdent cependant une différence de marche appréciable aux extrémités opposées de ce domaine. Si maintenant, en vertu du postulat quantique, on remplace la différence de marche par une différence d’impulsion, on arrive à la proposition formulée par Heisenberg d’après laquelle le produit de l’incertitude quant à la position par l’incertitude quant à l’impulsion est au moins de l’ordre de grandeur d’un quantum d’action. Plus la position d’un point configuratif sera déterminée d’une façon précise et plus la valeur de l’impulsion

sera incertaine et inversement. Les deux sortes d'incertitudes ont donc, jusqu'à un certain point, un caractère de complémentarité qui est cependant limité, en ce sens que, selon la mécanique ondulatoire, l'impulsion d'un point configuratif peut quelquefois être déterminée d'une manière précise alors que la position reste toujours plus ou moins incertaine à l'intérieur d'un certain domaine.

La relation d'incertitude d'Heisenberg est quelque chose de tout à fait inédit au point de vue de la mécanique classique. On a toujours su, il est vrai, que toute mesure est entachée d'une certaine incertitude ; mais, jusqu'à présent, on avait toujours admis que cette incertitude pouvait être indéfiniment réduite en raison de la perfection apportée aux méthodes de mesure. Mais, dans le cas actuel, c'est une raison de principe qui limite la certitude de la mesure et ce qu'il y a de plus remarquable c'est que cette limite ne s'applique pas séparément à l'une ou à l'autre de ces deux grandeurs : la position et la vitesse, mais à une combinaison des deux. En principe, chaque grandeur, prise à part, peut être mesurée aussi exactement que l'on voudra, mais aux dépens de l'exactitude avec laquelle l'autre sera connue.

Voilà certes une affirmation étrange, et pourtant, il y a des faits très nets en sa faveur. En voici un exemple : La mesure la plus directe et la plus précise de la position d'un point matériel a lieu par voie optique ; soit que l'on vise la particule à l'aide d'un instrument, soit qu'on la photographie. Mais il faut, pour cela, éclairer la particule, la mesure sera alors d'autant plus

exacte que l'on emploiera une lumière dont la longueur d'onde sera plus petite. Par ce moyen, on pourra arriver à une exactitude de plus en plus grande ; mais le revers de la médaille sera la mesure de la vitesse. S'il s'agit d'une masse assez forte, on pourra négliger l'action de la lumière sur l'objet illuminé ; il en sera tout autrement si l'objet a une masse très faible, s'il s'agit, par exemple, d'un électron isolé. Tout rayon lumineux qui atteint un électron est renvoyé par ce dernier, mais il subit un choc notable qui sera d'autant plus violent que la longueur d'onde de la lumière sera plus faible. Ainsi donc, plus l'onde lumineuse sera courte et plus la position du point sera connue avec exactitude ; mais, par contre, sa vitesse sera connue avec d'autant moins de certitude et il en est ainsi dans tous les cas analogues.

À la lumière de toutes ces considérations, la mécanique classique avec ses corpuscules invariables dont la position est bien déterminée et qui se meuvent avec une vitesse également connue exactement, n'est plus qu'un cas limite idéal. Ce cas se réalise quand le système considéré a une énergie relativement considérable ; alors les valeurs propres discontinues de l'énergie se suivent d'assez près et un domaine d'énergie relativement étroit contiendra de nombreuses ondes à haute fréquence (c'est-à-dire des ondes courtes) dont la superposition dans l'espace configuratif donne un petit paquet d'onde délimité qui possède une impulsion déterminée. La mécanique ondulatoire aboutit alors à la mécanique corpusculaire et l'équation différentielle de Schrödinger se ramène à l'équation différentielle classique de Hamilton Jacobi, c'est-à-dire que le

paquet d'onde se propage dans l'espace configuratif suivant les lois qui régissent en mécanique classique les mouvements d'un système de points matériels. Mais ceci ne dure en général qu'un temps, car les ondes matérielles élémentaires n'interfèrent pas toujours exactement de la même manière et le paquet d'ondes se dissoudra plus ou moins vite. La position du point configuratif deviendra de plus en plus incertaine et il ne restera plus, en fin de compte, comme grandeur bien définie, que la fonction d'ondes ψ.

Toutes ces considérations cependant concordent-elles bien avec l'expérience ? Le contrôle n'est possible que dans le domaine de la physique atomique à cause de la petitesse du quantum d'action et, même alors, il nécessite des dispositifs expérimentaux très perfectionnés et d'une sensibilité extraordinaire. Nous dirons seulement qu'il n'existe, pour le moment, aucun fait permettant de douter, en principe, de l'exactitude de la théorie quantique.

Quant à cette dernière, elle s'est développée et généralisée avec une rapidité foudroyante depuis la découverte de l'équation d'ondes. Nous ne pouvons songer à décrire ici tout ce qui a été fait dans cet ordre d'idées au cours de ces dernières années. Nous mentionnerons seulement, en passant, l'introduction de ce que l'on appelle le spin de l'électron et du proton, puis la formule relativiste de la mécanique des quanta, son application au problème moléculaire et l'étude du problème dit de plusieurs corps, c'est-à-dire l'application de la mécanique nouvelle à plusieurs ou même à un grand nombre de points

matériels identiques. À ce propos, un grand nombre de questions de statistique se posent qui se rapportent au calcul du nombre des états possibles dans un système clos doué d'une énergie donnée, et ces calculs comportent une détermination de l'entropie du système.

Je dois malheureusement renoncer à parler spécialement de la physique des quanta lumineux qui a subi, à certains égards, une évolution opposée à celle de la physique des points matériels. Dans ce domaine c'est, en effet, la théorie ondulatoire de Maxwell qui était incontestablement maîtresse à l'époque de la physique classique. Ce n'est que plus tard qu'apparut nécessaire l'introduction de particules lumineuses discrètes de telle sorte que les ondes électromagnétiques sont devenues des ondes de probabilité tout comme les ondes matérielles.

On ne saurait trouver de preuve plus impressionnante du fait qu'une théorie purement ondulatoire est aussi incapable de satisfaire aux exigences de la physique moderne qu'une théorie purement corpusculaire ; ces deux théories ne sont, à tout prendre, que des cas limites. D'une part la théorie corpusculaire, inséparable de la mécanique classique, satisfaisante en ce qui concerne la configuration d'un système donné, échoue quand il faut déterminer les valeurs propres de son énergie et de sa quantité de mouvement. D'autre part, la théorie ondulatoire caractéristique de l'électrodynamique, si elle peut permettre de calculer l'énergie et la quantité de mouvement, reste complètement étrangère à toute détermination de la localisation des particules lumineuses. Le

cas général intéresse tout le domaine intermédiaire et les deux théories y jouent un rôle sensiblement équivalent et, en adoptant soit l'une, soit l'autre, il n'est possible de s'approcher que très peu de la solution, et encore d'une manière, en quelque sorte, provisoire. Il reste d'ailleurs un grand nombre de questions à élucider : l'avenir seul dira quelle est la meilleure voie pour les résoudre parmi les diverses méthodes proposées. Sera-ce le calcul matriciel le premier en date imaginé par Heisenberg, Born et Jordan, la mécanique ondulatoire de de Broglie et Schrödinger ou la mathématique des nombres quantiques due à Dirac ?

IV

Si nous essayons maintenant, à la lumière des exposés qui précèdent, de nous faire une idée aussi synthétique que possible du système de l'univers selon la physique moderne, notre première impression sera certainement très peu satisfaisante. Et tout d'abord, il semblera étrange que la mécanique ondulatoire, tout en formant un contraste absolu avec la mécanique classique, n'en utilise pas moins des concepts qui sont tout simplement pris à la théorie physique des corpuscules ; telles sont, par exemple, les notions de coordonnées et de quantité de mouvement d'un point matériel et, aussi, celle de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle d'un système de points ; alors que, d'autre part, il est tout à fait impossible de déterminer simultanément d'une façon précise la position et la quantité de mouvement d'un point. Cependant ce sont là des concepts indispensables à la mécanique ondulatoire ; sans eux

on ne saurait, en effet, définir l’espace configuratif ni en déterminer la métrique.

Les ondes matérielles ne donnent certainement pas aussi facilement prise à notre intuition que les ondes électromagnétiques ou acoustiques et c’est là une des raisons qui contribuent à rendre difficile la compréhension de la mécanique ondulatoire. Les ondes matérielles ne se propagent pas, en effet, dans l’espace ordinaire mais dans l’espace de configuration et leur période vibratoire dépend du système physique auquel elles appartiennent. L’énergie du système sera d’autant plus grande et la fréquence vibratoire d’autant plus élevée que le système choisi sera plus étendu.

Dans ces conditions, il n’est certes pas facile de rassurer quelqu’un qui hésiterait à adopter la théorie nouvelle. Il obtiendrait cependant, en fin de compte, l’apaisement désiré si seulement on pouvait lui démontrer qu’elle ne comporte aucune contradiction interne, qu’on peut l’appliquer sans équivoque et qu’elle donne des résultats importants, contrôlables par des mesures. Mais, à ce point de vue même, les opinions sont quelque peu divergentes. C’est pourquoi je me permettrai de m’étendre sur ce point fondamental.

On a souvent fait observer, avec insistance, que la mécanique quantique ne prend en considération que des grandeurs observables en principe et ne s’occupe que de questions ayant un sens physique. Ceci est certainement exact, mais on ne saurait dire que cela constitue pour la théorie des quanta un avantage qui lui soit propre et qui la distingue de tout autre. En

effet, on ne peut décider, *a priori*, si une question a ou non un sens physique. Il faut, pour cela, se placer dans la perspective d'une théorie donnée. Les diverses théories physiques diffèrent, en effet, précisément en ce que, suivant l'une d'elles, une grandeur est observable, en principe, alors que, suivant l'autre, il n'en est pas ainsi. La vitesse absolue de la terre est observable, en principe, d'après les théories de Fresnel et de Lorentz qui admettent un éther en repos absolu ; cette même vitesse ne l'est pas d'après la théorie relativiste. D'après la mécanique newtonienne, l'accélération absolue d'un corps est observable en principe ; ce qui ne peut être d'après la théorie relativiste. De même le problème de la réalisation du mouvement perpétuel avait un sens physique avant l'introduction dans la science du principe de la conservation de l'énergie. L'étude de la nature des théories, prises en elles-mêmes, ne suffit d'ailleurs pas pour permettre d'opter entre ces contradictoires, cela appartient à l'expérience seule. Il ne suffit donc pas, pour caractériser la supériorité de la mécanique ondulatoire, de dire qu'elle ne comporte que des grandeurs observables en principe, car la même chose est vraie de la mécanique classique. Ce qu'il faut, c'est, d'abord, dire quelles sont les grandeurs qui sont observables d'après cette théorie et celles qui ne le sont pas ; et ensuite prouver que l'expérience est d'accord avec cette classification. Or cette preuve, il semble bien qu'elle ait été effectivement apportée, dans la mesure du possible, entre autres, dans le cas des relations d'incertitude d'Heisenberg déjà mentionnées plus haut. On peut donc y voir un motif permettant d'affirmer la supériorité de la mécanique

ondulatoire. Cependant, en dépit de ce succès apparent, les dites relations n’en sont pas moins considérées comme choquantes par un grand nombre d’esprits. La raison en est, sans doute, que ces relations entraînent, en un certain sens, une inexactitude de principe dans la définition de grandeurs qui jouent un rôle continuel dans nos calculs. Le malaise est même encore notablement accru par le fait de l’introduction du concept de probabilité dans l’interprétation des équations de la mécanique quantique. Il semble que l’on veuille renoncer à se soumettre aux exigences d’une causalité stricte pour adopter un certain indéterminisme. Et de fait, à l’heure actuelle, il y a des physiciens éminents qui seraient très portés à retirer au principe de causalité strict son rôle dans le système physique de l’univers.

Si jamais une telle démarche s’avérait comme nécessaire, il faudrait bien convenir que l’on s’est, par là même, écarté notablement du but poursuivi par la physique et que l’on s’est chargé d’un fardeau dont on ne saurait exagérer l’importance. En effet, en supposant que l’on ait le choix, il faudrait toujours, à mon avis, préférer le déterminisme à l’indéterminisme, tout simplement parce qu’une réponse déterminée à une question est toujours préférable à une réponse indéterminée.

Mais, autant que je puis m’en rendre compte, il n’y a, pour le moment, aucune nécessité de se résigner à l’indéterminisme. Il reste, en effet, toujours la ressource, quand une réponse déterminée à une question est impossible de rechercher la cause de cette impossibilité, non pas dans la nature de la

théorie en question, mais dans celle de la question posée. Si une question n'est pas posée d'une façon suffisamment précise, la plus parfaite des théories ne saurait faire qu'on puisse lui apporter une réponse précise. Ceci est un lieu commun tout à fait banal et une remarque qui a souvent été faite à propos de la statistique classique. Dans l'exemple classique du choc de deux billes dans un plan horizontal, bien que les vitesses des billes avant le choc soient parfaitement connues, il n'en est pas moins impossible de donner ces mêmes vitesses après le choc. Nous savons, en effet, que pour calculer les quatre composantes de ces vitesses nous ne disposons que de trois équations. La loi de conservation de l'énergie donne une de ces équations et celle des composantes des impulsions, les deux autres. Nous ne prétendons cependant pas pour cela que le phénomène du choc n'est pas régi par une causalité stricte. Nous disons seulement que certaines données, essentielles pour la détermination du problème, nous manquent.

Si nous vouions maintenant appliquer ce qui vient d'être dit aux problèmes actuels de la physique des quanta, nous devrons, avant de conclure, revenir sur les points qui ont été traités au début de ce chapitre. S'il est parfaitement exact d'affirmer que la structure de l'univers physique s'écarte toujours davantage du monde sensible et tend par de continuelles mutations à se rapprocher de plus en plus d'un monde « réel », inconnaissable par principe, il en résulte évidemment que ce système se trouve être par là même débarrassé de plus de ses éléments anthropomorphiques. Il faut donc exclure la possibilité de l'admission, dans l'édifice constitué par le système physique de

l’univers, de notions se rattachant de quelque manière à la technique métrologique humaine ; mais ce reproche ne saurait en aucune façon atteindre les relations d’incertitude d’Heisenberg. Cela paraîtra évident si l’on veut bien remarquer que les éléments structurels de l’univers ne sont point les corpuscules, mais les ondes matérielles simplement périodiques qui correspondent au système physique étudié. Les relations d’incertitude découlent alors de cette proposition mathématique qu’il n’est pas possible de définir un point unique, doué d’une impulsion bien définie, par la superposition de telles ondes. Tout ceci, il est clair, n’a rien à voir avec des mesures. D’autre part, les ondes matérielles sont déterminées d’une façon parfaitement univoque, si l’on traite le problème mathématique de valeur limite correspondant. Il n’y a donc aucune espèce d’indéterminisme.

La question du rapport existant entre les ondes matérielles et le monde de nos perceptions sensibles est une tout autre question et c’est elle qui nous introduit dans la connaissance des phénomènes physiques ; car s’il existait un système physique parfaitement clos, nous n’en aurions évidemment aucune expérience. C’est là une question qui semble dépasser, au premier abord, le domaine de la physique et concerner aussi le domaine de la physiologie et même celui de la psychologie. Cependant, même de ce côté, il n’y a pas de difficulté insurmontable.

On peut, en effet, supposer que les organes des sens humains sont toujours remplacés par des instruments de mesures

physiques appropriés agissant comme des enregistreurs automatiques(un exemple dans cet ordre d'idée est celui de la plaque photographique), le rôle de ces instruments étant de retenir les impressions qui leur viennent du milieu ambiant et de rendre ainsi témoignage des phénomènes qui s'y passent. Si nous comprenons tous ces instruments dans le système physique considéré, en écartant toutes les autres influences, nous formons un système clos dont nous pouvons savoir quelque chose par des mesures, à condition toutefois, de prendre en considération la structure des instruments qu'on y comprend et les réactions qu'ils exercent sur les phénomènes à mesurer.

Si nous possédions un instrument de mesure qui réagisse sur une onde matérielle de la même manière qu'un résonateur acoustique réagit sur une onde sonore, nous pourrions mesurer les ondes matérielles isolément et, par là même, analyser tout le phénomène ondulatoire ; mais tel n'est pas le cas. Les données des instruments de mesure, par exemple le noircissement de la plaque photographique, ne nous permettent de tirer aucune conclusion précise sur le détail du phénomène ; mais ce n'est pas une raison pour que les ondes matérielles soient indéterminées. L'indéterminisme pourrait, il est vrai, s'appuyer sur un autre fait. Selon la mécanique ondulatoire, les phénomènes qui se passent dans un système soustrait aux influences extérieures ne sont aucunement déterminés par l'état initial, c'est-à-dire par l'impulsion et par la configuration initiales ; car le paquet d'ondes qui correspond à l'état initial se dissoudra, en général, avec le temps en ses ondes de probabilité

composantes. Cependant, à y regarder de plus près, on s'aperçoit que, dans ce cas, l'indéterminisme ne provient que de la façon dont le problème est posé, car cette manière de parler est empruntée à la mécanique corpusculaire dans laquelle, en effet, le phénomène est déterminé à chaque instant par l'état initial ; elle ne convient pas à la mécanique ondulatoire parce que cette dernière comporte, en raison de la relation d'incertitude, une imprécision de principe dont la valeur est finie.

Par contre, il existe en mécanique classique une autre manière de poser la question qui conduit également à une réponse précise en mécanique ondulatoire. Un phénomène est complètement déterminé et cela, à chaque instant, quand, en plus de la configuration à cet instant, on donne non pas l'impulsion, mais la configuration à un autre instant. Pour ce calcul, on s'appuie sur un principe de variation : le principe de la moindre action. De même, dans l'exemple cité plus haut des billes élastiques, si l'on donne les positions initiales et finales des deux billes et l'intervalle de temps qui les sépare, les trois inconnues qui restent, à savoir les deux coordonnées spatiales du point de choc et l'instant où il à lieu, sont parfaitement déterminées.

Cette modification dans la façon de poser le problème, contrairement à la précédente, est immédiatement applicable à la mécanique ondulatoire. Sans doute, comme nous l'avons déjà vu, aucune configuration initiale ne saurait être déterminée rigoureusement ; mais on peut cependant, réduire cette

indétermination au delà de toute limite donnée à l'avance. Le phénomène est donc connaissable avec une approximation aussi grande qu'on le voudra. Quant à la dissolution du paquet d'onde elle ne sauvait en aucune façon servir d'argument en faveur de l'indéterminisme. Car un paquet d'onde peut tout aussi bien se former que se dissoudre. En effet, tout comme en mécanique corpusculaire, le signe de la grandeur temps ne joue aucun rôle et tout phénomène peut se dérouler dans un sens aussi bien que dans le sens contraire.

Naturellement, en adoptant cette manière de parler, un paquet d'onde déterminé n'existe qu'aux deux instants qui ont été choisis ; dans tout l'intervalle qui les sépare ainsi que dans le temps qui précède et dans le temps qui suit, chaque onde élémentaire se comporte comme si elle était seule. Mais, que l'on nomme ces ondes matérielles ou ondes de probabilité, elles n'en sont pas moins entièrement déterminées dans tous les cas. Ainsi peut s'expliquer un paradoxe apparent : si, par une voie quelconque, un système physique passe, en un temps déterminé, d'une configuration déterminée à une autre configuration également donnée, la question de savoir ce que la configuration est, pendant le temps intermédiaire, n'a aucun sens physique. C'est pourquoi, aussi, en se plaçant au même point de vue, il n'y a aucun sens à parler de la trajectoire d'un quantum lumineux émis par une source de lumière et absorbé à un endroit bien déterminé de l'écran d'observation.

Il est toutefois bien certain que cette façon d'envisager le déterminisme diffère quelque peu de celle qui était habituelle

en physique classique. Dans cette physique, c'était la configuration qui était déterminée, ici ce sont les ondes matérielles. Cette différence est importante ; car la configuration est liée au monde sensible d'une façon bien plus immédiate que les ondes matérielles.

C'est là un inconvénient, mais il est le prix dont a dû être payé le maintien du déterminisme dans l'univers. Les relations entre le système de l'univers et le monde sensible se sont donc, nous le voyons, encore nettement relâchées dans la nouvelle physique. De plus, la transformation s'est accomplie dans le sens dont nous vous avons déjà maintes fois parlé, et qui est tout à fait caractéristique de l'évolution suivie effectivement par les idées scientifiques. Nous voyons la science progresser toujours davantage dans la mesure où, adoptant des formes de plus en plus abstraites, elle s'éloigne toujours davantage du monde sensible. Il semble que le principe de relativité, lui-même, impose en mécanique ondulatoire le point de vue dont il vient d'être question. En effet, si d'après ce principe, il y a lieu de traiter le temps et l'espace exactement sur le même pied, il s'ensuit que la considération d'un domaine spatial fini étant nécessaire à la description causale d'un phénomène physique, la considération d'un intervalle de temps fini est également nécessaire dans le même but.

Peut-être, cette manière de poser la question, suppose-t-elle un point de vue, trop étroit, trop entaché d'anthropomorphisme pour pouvoir servir de base satisfaisante à l'édification du nouveau système de l'univers. Peut-être faudra-t-il chercher

autre chose, en tout cas, il y aura, à cet égard, bien des problèmes difficiles à résoudre, bien des points obscurs à élucider.

La situation singulièrement difficile où se trouve aujourd'hui la physique, fait qu'on ne saurait échapper à un certain sentiment de doute et qu'on se demande si la théorie nouvelle, avec toutes ses innovations radicales, est bien dans la bonne voie. La réponse à cette angoissante question sera apportée seulement quand nous saurons si le contact avec le monde sensible pourra continuer à être maintenu, au cours de l'élaboration progressive du système de l'univers sur de telles bases. Faute de ce contact, le système le plus parfait ne serait qu'une bulle de savon prête à éclater au moindre souffle.

Nous pouvons heureusement aujourd'hui être pleinement rassurés à cet égard. Il n'est pas, en effet, exagéré de dire, qu'à aucune époque plus qu'à la nôtre, l'histoire de la physique ne nous a montré la théorie marchant davantage la main dans la main avec l'expérience. Ce sont précisément les faits expérimentaux qui ont ébranlé, puis ruiné la théorie classique. À l'origine de toute nouvelle idée, de tout nouveau pas en avant, les tâtonnements de la recherche sont étayés par les résultats des mesures, quand ils ne sont pas commandés par elle. Au début de la théorie de la relativité, nous trouvons l'expérience optique d'interférence de Michelson ; de même, au seuil de la théorie des quanta, nous trouvons les mesures de Lummer et de Pringsheim, celles de Rubens et de Kurlbaum sur la répartition de l'énergie spectrale, celles de Lenard sur

l'effet photoélectrique, celles de Franck et de Hertz sur le choc des électrons. Je serais entraîné trop loin si je voulais mentionner tous les résultats expérimentaux, tellement ils sont nombreux. Quelques-uns furent cependant tout à fait étonnants. C'est à cause d'eux que la théorie s'est éloignée du point de vue classique et a adopté une voie bien à elle.

Il nous reste à souhaiter et à espérer qu'aucun obstacle ne vienne à se dresser contre une collaboration aussi féconde, qui suscite une émulation pacifique chez tous les savants de tous les pays. C'est dans ce mouvement d'échanges perpétuels entre la recherche théorique et le travail expérimental, à la fois contrôle et impulsion, que se trouve l'unique garantie des grands triomphes futurs de la physique.

Où allons-nous ? J'ai déjà eu l'occasion de souligner que la recherche poursuit un double but : d'une part, se rendre compte de l'univers sensible et d'autre part tendre à acquérir une connaissance complète du monde réel. Cette connaissance parfaite est impossible en principe, s'il s'agit du monde réel ; mais rien ne serait plus insensé que de céder pour cela au découragement : nous avons déjà obtenu trop de succès, tant théoriques que pratiques, et nous voyons leur nombre s'accroître chaque jour. Peut-être même est-ce une vraie bénédiction pour l'humanité, engagée dans la voie du progrès, que la palme de la victoire se trouve sur un terrain inaccessible. Grâce à cette circonstance, nous voyons l'homme prendre soin de maintenir et cultiver ses deux plus nobles instincts : l'enthousiasme et le respect.

CHAPITRE IX

LE POSITIVISME ET LA RÉALITÉ DU MONDE EXTÉRIEUR

C’est un monde étrange que celui où nous vivons. De quelque côté que nous portions nos regards, dans tous les domaines, qu’il s’agisse du côté matériel de la civilisation ou de son aspect spirituel, nous sommes entrés dans une période de crise grave et cette crise imprime à notre vie, tant publique que privée, un caractère d’incertitude qui se manifeste de multiples façons. Il y a des gens qui voient dans cet état de choses le prélude d’une ascension grandiose ; d’autres pensent, au contraire, que nous sommes en présence des prodromes d’une décadence inévitable. Comme autrefois, en matière religieuse, et plus tard dans le domaine de l’art, il n’y a plus maintenant, sur le terrain scientifique, pour ainsi dire, aucun principe dont la validité n’ait été mise en doute ; il n’y a pas une extravagance qui n’ait trouvé des partisans. C’est à se demander s’il existe encore une vérité susceptible d’être tenue pour intangible et capable de constituer un point d’appui solide pour résister à l’assaut d’un scepticisme qui ébranle tout.

De la logique, telle que nous la voyons mise en œuvre, sous sa forme la plus pure, dans les mathématiques, nous ne saurions attendre aucun secours. Certes, la logique, elle-même, doit bien

être regardée comme inébranlable ; il n'en est pas moins vrai que son rôle se borne à établir des relations. Pour acquérir une portée réelle et une signification, il lui faut un point d'appui fixe ; la chaîne la mieux forgée ne saurait être tenue pour un point d'appui sûr, si elle n'est solidement attachée quelque part.

Où trouverons-nous, maintenant, ce point d'appui indispensable à notre connaissance de l'univers ? La première idée que vient à l'esprit sera de nous tourner vers la plus exacte de toutes les sciences : la physique. Pourtant, elle aussi, n'a pas été épargnée par la crise. L'incertitude a envahi son domaine et il y a conflit d'opinions dans des questions ayant rapport avec la théorie de la connaissance. Les principes les plus incontestés de cette science ; bien plus, le principe de causalité lui-même, ont été quelquefois jetés par-dessus bord. Aussi voyons-nous que, de temps en temps, on tire argument de la crise de la physique en faveur de l'incertitude de tout savoir humain.

Je prendrai donc la liberté, en tant que physicien, et en me plaçant au point de vue de ma science, de donner un aperçu de la position prise par la physique vis-à-vis des questions qui se posent à l'heure actuelle. Il n'est pas impossible, d'ailleurs, que nous arrivions à certaines conclusions, applicables également à d'autres domaines de l'activité humaine.

I

La source de tout savoir et, par conséquent, l'origine de toute science, se trouve dans nos impressions individuelles. Celles-ci constituent, en effet, les données les plus immédiates et les plus

réelles qui se puissent imaginer et elles sont le point de départ de tous les raisonnements dont se compose la science. La matière première de toute science provient ; soit, directement, de nos sensations, soit, indirectement, des leçons de nos maîtres et des livres qu'ils ont écrits. Nos connaissances n'ont point d'autres sources.

En physique, nous avons affaire aux impressions sensibles qui nous proviennent de la nature inanimée et qui trouvent leur expression dans des mesures et dans des observations plus ou moins exactes. Le contenu de tout cela, qui est tout ce que nous voyons, touchons ou entendons, constitue donc une donnée immédiate et une réalité incontestable. Mais il est, néanmoins, une question qu'il faut se poser : Est-ce là un fondement suffisant pour la physique ? La tâche qui incombe à cette science est-elle complètement définie quand on a dit qu'elle consiste à rassembler toutes nos observations sur les phénomènes naturels, sous un régime de lois, aussi simples et aussi exactes que possible ? Le mouvement d'idées qui se rattachent à l'opinion de ceux qui répondent par l'affirmative à cette question sera appelé par nous « positivisme ». Il est résolument appuyé, à l'heure actuelle, par nombre de physiciens et de philosophes, en raison de l'insécurité de la situation générale. Le mot de « positivisme » a été pris dans bien des acceptions depuis Auguste Comte, c'est pourquoi nous croyons nécessaire de préciser le sens dans lequel nous l'employons et qui est d'ailleurs un des plus usuels.

Le positivisme est-il une base suffisante pour permettre d'édifier entièrement la physique ? Nous ne saurions trouver de meilleure méthode pour le savoir que de considérer où cette doctrine nous conduit dans le cas où nous lui faisons entièrement confiance et à quelles conclusions nous aboutissons en l'adoptant intégralement. Nous nous placerons donc d'abord à un point de vue purement positiviste et nous nous efforcerons, naturellement, de nous astreindre à la logique la plus rigoureuse, évitant avec soin de nous laisser entraîner à des jugements dictés par la coutume ou par le sentiment. Nous pourrons, sans doute, arriver à des conclusions un peu étranges ; mais, du moins, nous serons certains qu'aucune contradiction logique ne nous aura échappé, car nous demeurerons dans le domaine des impressions individuelles et nous savons que deux impressions de cette sorte ne peuvent jamais se contredire. Inversement, nous sommes tout aussi assurés qu'aucune impression, quelle qu'elle soit, ne pourra être exclue de notre prise en considération, de telle sorte que nous n'ignorerons aucune des sources du savoir humain. Telle est, il faut le reconnaître, le point fort du positivisme : il s'occupe de toutes les questions susceptibles d'être résolues par des observations et, réciproquement, toutes les questions auxquelles il attribue un sens peuvent être résolues au moyen d'observations. Aux yeux du positiviste, il n'y a donc, par principe, aucun mystère, aucune obscurité, tout se passe au grand jour.

À vrai dire, il n'est pas très simple de persévérer dans cette ligne de conduite jusque dans les moindres détails.

Et tout d’abord notre langage usuel, lui-même, s’en écarte constamment. Quand nous parlons d’un objet, d’une table par exemple, nous pensons à quelque chose qui est différent du contenu des observations que nous pouvons faire sur cette table. Nous pouvons voir la table, la toucher, éprouver sa résistance, sa dureté. Si nous la heurtons, nous en ressentirons de la douleur ; mais nous ne savons rien d’une chose qui mènerait une existence autonome derrière et en dehors de toutes ces sensations. Aux yeux du positivisme, la table ne sera donc pas autre chose que le complexe des sensations associées au mot « table ». La question de savoir ce qu’est « en réalité » une table n’a, pour lui, aucun sens. Si une question, ayant trait à l’univers, ne peut être ramenée d’une manière quelconque à une impression sensible ou à une observation, elle n’a pas de sens et elle ne saurait être posée légitimement. Le positivisme ne laisse donc aucune place à la métaphysique.

Considérons le ciel étoilé. L’image que nous en avons est celle de points ou de minuscules plages lumineuses dont les mouvements peuvent être soumis à des mesures plus ou moins exactes et dont le rayonnement est, lui aussi, susceptible d’être mesuré, tant au point de vue de l’intensité que de la couleur. Ces mesures, à parler en positiviste, ne constituent pas seulement la base de l’astronomie et de l’astrophysique, elles en sont, à proprement parler, le contenu propre et exclusif. Tout ce qui est ajouté aux résultats des mesures, pour les besoins de la compréhension, est un hors-d’œuvre purement humain, une libre invention de l’esprit.

Dire par exemple, avec Ptolémée : la terre est le centre du monde, le soleil et tous les astres se meuvent autour d'elle ; ou bien affirmer, avec Copernic : la terre n'est qu'un point infime, une poussière dans l'univers, ce point fait un tour sur lui-même en un jour et met une année à tourner autour du soleil ; ce n'est, pour le positiviste, qu'exprimer la même observation de deux façons différentes. Les observations sont la seule chose qui ait une existence effective et l'unique avantage, à l'actif de la théorie copernicienne, est qu'elle est plus simple à formuler et plus facile à généraliser. Les lois de l'astronomie ne pourront en effet s'exprimer que d'une manière beaucoup plus compliquée en adoptant le langage de Ptolémée. Copernic serait donc un inventeur génial et non pas le pionnier qui a découvert une voie nouvelle. Le positivisme ne tient aucun compte du bouleversement des esprits opéré par les idées coperniciennes, aucun compte des luttes acharnées qui en ont été la conséquence, pas plus qu'il ne tient compte des sentiments de silencieux respect éveillés par la contemplation du ciel étoilé chez tout esprit méditatif, surtout s'il se remémore que chaque étoile de la voie lactée est un soleil dans le genre du nôtre ; que chaque nébuleuse spirale est une voie lactée dont la lumière met des millions d'années à nous parvenir. Considérée à la même échelle, l'importance de la terre et du genre humain qu'elle porte, s'évanouit dans l'infiniment petit ; mais ce sont là pensées qui ressortissent aux domaines esthétique ou éthique, aussi convient-il de les éliminer dès lors qu'il s'agit, comme ici, de question se référant uniquement à la théorie de la connaissance. C'est pourquoi

nous continuerons à suivre le cours de nos idées sans nous préoccuper d'autre chose que de leur rigueur logique.

D'après la doctrine positiviste, les perceptions sensibles, étant une donnée primitive et constituant la réalité immédiate, il est donc, par principe, faux de parler d'illusions des sens. Ce ne sont pas nos sensations elles-mêmes qui peuvent quelquefois nous induire en erreur, mais les conclusions que nous en tirons. Si nous enfonçons un bâton dans l'eau, il nous apparaît brisé au point d'immersion ; mais cette brisure n'est pas une illusion, due à la réfraction de la lumière ; elle doit être regardée comme une perception optique véritable. Si nous adoptons une autre manière de parler et si nous disons que notre perception sensible se comporte comme si le bâton était droit et comme si les rayons lumineux subissaient une déviation en traversant la surface de l'eau, c'est pour de simples raisons de commodité. L'essentiel de toutes ces considérations et de bien d'autres, analogues, c'est que le positivisme maintient, en droit, la balance parfaitement égale entre les deux manières de s'exprimer ; c'est pourquoi il est absurde, selon lui, de chercher à trancher entre elles, autrement qu'en se plaçant au simple point de vue de la commodité. La priorité accordée au sens du toucher ne serait donc qu'une priorité purement pratique.

En fait, on ne saurait le nier, en poussant jusqu'à ses dernières limites la théorie du « comme si » on aboutirait à de bien étranges conséquences. Mais il n'en est pas moins vrai qu'au point de vue purement logique elle est inattaquable.

Il va de soi que les mêmes remarques s’appliquent aux objets animés. Pour le positiviste, un arbre n’est pas autre chose qu’un complexe de sensations. Nous pouvons le voir pousser, entendre le bruissement de ses feuilles, respirer le parfum de ses fleurs ; mais si nous faisons abstraction de tout cela, il ne reste absolument rien à quoi la qualification d’arbre « en soi » puisse être attribuée.

Ce qui vaut pour le règne végétal, vaut aussi pour le règne animal. C’est donc seulement pour des raisons de commodité que nous disons, à propos d’un animal, qu’il a une existence autonome et possède une vie propre. Un ver que l’on écrase, cela tout le monde peut le voir ; mais il n’y a aucun sens à se demander si ce ver éprouve de la douleur. Nous ne sentons, en effet que notre propre douleur, nous admettons l’existence, celle d’un animal, parce que cette hypothèse est celle qui permet de rendre plus commodément compte de certains phénomènes concomitants, tels que les mouvements rétractiles, les contorsions, les cris qui accompagnent aussi notre propre douleur.

Passons enfin de l’animal à l’homme, dans ce cas, le positivisme réclame une séparation radicale entre nos propres impressions et celles des autres. Il n’y a, en effet, à être absolument réelles que nos propres impressions ; celles des autres hommes ne sont que le résultat d’une inférence indirecte. C’est pourquoi, à parler en toute rigueur, il convient de classer ces impressions parmi les inventions.

Il est bien certain qu'on peut aller jusqu'au bout dans cet ordre d'idées sans jamais craindre de tomber dans la contradiction logique et, pourtant, il n'en est pas moins vrai que la science physique se trouve être amenée ainsi dans une situation bien périlleuse. En effet, si cette science a pour unique objet, à parler en toute rigueur, nos impressions sensibles, elle doit se borner à nos impressions personnelles du fait que ces impressions constituent les seules données immédiates dont nous disposions. Mais il n'est à la portée de personne de constituer une science complète à l'aide de ses seules impressions personnelles : cela est tout à fait évident. En conséquence, ou bien il faut renoncer à l'acquisition d'une science de quelque étendue, ou bien il faudra en venir à un compromis en vertu duquel les impressions qui nous sont étrangères devront concourir, elles aussi, à l'édification de la science et c'est là une extrémité à laquelle le positivisme le plus strict ne voudra guère se résoudre, car elle équivaut à une renonciation à maintenir son point de vue, d'après lequel les données primitives et immédiates sont seules à avoir le droit de cité dans la science. Une autre conséquence de ce même compromis sera l'introduction d'un facteur nouveau. La crédibilité des témoignages soit oraux, soit écrits, qui nous viennent d'autrui, doit intervenir dans la définition de la science. Le principe fondamental du positivisme « n'admettre que des données incontestables » se trouve donc être, logiquement battu en brèche.

Passons néanmoins sur cette difficulté et admettons que tous les témoignages au sujet des phénomènes physiques soient

dignes de foi ou, si l’on veut, admettons qu’il existe un critérium infaillible permettant de distinguer les témoignages dignes de foi de ceux qui ne le sont pas. Il restera que tout physicien présent ou à venir, pourvu qu’il soit honnête, aura un droit strict à ce que ses impressions personnelles soient prises en considération ; car il n’existe aucune raison d’exclure certaines impressions plutôt que d’autres. Il serait notamment tout à fait injustifié de ne prêter que peu d’attention aux dires d’un savant sous prétexte que ses collègues ne sont pas arrivés à éprouver les mêmes impressions que lui.

À ce point de vue, on ne saurait comprendre ni justifier comment on ignore complètement à l’heure actuelle les rayons dits « N » découverts par le physicien français Blondiot en 1903. René Blondiot, professeur à l’université de Nancy, était certes, un expérimentateur excellent et digne de confiance et sa découverte était pour lui une impression personnelle, tout comme les découvertes d’autres physiciens sont pour eux des impressions personnelles. Nous ne pouvons, d’autre part, dire qu’il a été victime d’une illusion des sens puisque, d’après la physique positiviste, il n’y a pas d’illusions de cette sorte. Il faut donc considérer les rayons « N » comme une réalité perçue directement ; et, si personne depuis l’époque, déjà lointaine, de Blondiot n’a réussi à les reproduire, au point de vue positiviste, personne ne peut savoir si la chose ne deviendra pas de nouveau possible, dans certaines circonstances.

Il faut ajouter à cela que le nombre des personnes dont les impressions sont utilisables pour la physique est très petit.

Évidemment on ne peut prendre en considération que les personnes qui se sont consacrées à cette science ; car les impressions des profanes sont toujours, en la matière, plus ou moins sujettes à caution. Nous devons, en outre, éliminer tous les théoriciens dont les impressions, du fait qu'elles se bornent essentiellement à celles qui résultent de l'usage du papier et de l'encre, ainsi que de l'activité de la substance cérébrale, ne nous apportent aucun matériel nouveau pour l'édification de la physique. Il ne restera donc, en fin de compte, que les physiciens expérimentaux et surtout ceux qui possèdent les instruments particulièrement sensibles nécessaires aux recherches spéciales. Les impressions sensibles qui contribuent à l'élaboration de la physique proviennent donc tout au plus, de quelques personnes. Comment comprendre alors que les impressions d'un Œrsted observant la déviation de sa boussole par un courant galvanique ; celles d'un Faraday apercevant pour la première fois un effet d'induction électromagnétique ; celles d'un Hertz cherchant à la loupe de minuscules étincelles au foyer de son miroir parabolique ; comment comprendre, dis-je, que ces impressions aient suscité tant d'attention dans le groupe international des physiciens et y aient provoqué un tel bouleversement ?

À cette question, le positivisme ne peut donner qu'une réponse très embrouillée et aussi peu satisfaisante que possible. Il lui faut s'appuyer sur la crédibilité de la théorie qui a permis d'espérer que des impressions sensibles insignifiantes, par elles-mêmes, pourraient amener dans l'avenir d'autres personnes à éprouver un grand nombre d'impressions ; celles-

là, importantes en elles-mêmes et par leurs conséquences heureuses. Cependant, d'autre part la doctrine positiviste est caractérisée par le fait, dont elle tire gloire, qu'elles se borne à décrire des impressions effectivement éprouvées. Aussi, d'après elle, on ne doit pas chercher à savoir pourquoi telle impression d'un physicien, même s'il n'en donne qu'une description tout à fait rudimentaire, possède aussitôt une grande valeur aux yeux des physiciens de tout l'univers : c'est là une question qui n'a pas de sens physique.

La raison d'être de ce paradoxe évident, est facile à comprendre. Le positivisme, quand il veut être conséquent avec lui-même, repousse l'existence et même la simple possibilité d'une physique indépendante de l'individualité du savant. Il y est contraint parce qu'il ne reconnaît, en principe, pas d'autre réalité que les impressions individuelles éprouvées par les divers physiciens. Je n'ai pas besoin de dire que, par là même, se trouve être résolue, de façon à exclure le moindre doute, la question de savoir si le positivisme, suffit à l'édification de la science physique ; car une science qui repousse, par principe, l'objectivité de son objet, prononce elle-même sa propre condamnation. La base sur laquelle repose le positivisme est, nous le concédons, solide ; mais elle est trop étroite. Il est donc nécessaire d'élargir cette base, ce que nous ferons en disant que la science doit être, autant que possible, débarrassée de toutes les influences provenant du facteur individuel humain. Pour y arriver il lui faudra faire un pas dans le domaine de la métaphysique. À cette démarche, la saine raison et non plus la seule logique formelle nous convie. Elle consiste à poser

l’hypothèse que nos impressions personnelles ne constituent pas, en tant que telles, l’univers physique ; mais seulement en tant qu’elles sont les témoins d’un autre monde qui se tient caché derrière elles et qui ne dépend pas de nous. Ceci revient à admettre l’existence d’un monde extérieur réel.

On le voit, nous sommes arrivés, au point où le « comme si » positiviste doit être mis de côté, et il en est de même des prétendues inventions commodes dont nous avons cité plus haut des exemples. Celles-ci doivent être considérées comme possédant un degré de réalité supérieur à celui qui convient à de simples descriptions d’impressions sensibles. La tâche de la physique se trouve donc par là même être changée : elle n’a plus à décrire des impressions ; elle a à nous faire connaître le monde réel. À vrai dire, l’adoption de ce nouveau point de vue n’est pas sans entraîner des difficultés au point de vue de la théorie de la connaissance ; car il faut, malgré tout, donner raison au positivisme quand il affirme que nos impressions sensibles sont l’unique source de nos connaissances. Ces deux propositions : « il y a un monde réel indépendant de nous » et « nous ne pouvons pas avoir une connaissance immédiate du monde réel », sont inséparables ; elles sont le pivot de la science physique tout entière. Elles sont opposées l’une à l’autre, dans une certaine mesure, c’est pourquoi aussi elles introduisent en physique cette part d’irrationnel que nous voyons également inhérer à toute science et qui fait qu’aucune d’elles n’est jamais capable de remplir complètement sa tâche. C’est là un fait contre lequel il ne sert de rien de se révolter ; on ne saurait non plus l’éliminer de l’univers en restreignant la

tâche de la science, ainsi que le voudrait le positivisme. Le travail scientifique doit donc être conçu comme un effort vers un but qui ne sera jamais atteint ; car il est inaccessible par principe. Ce but est de nature métaphysique, il est donc au delà de toute science.

Mais, répondra-t-on, ne serait-ce pas priver la science de toute portée que de lui assigner pour but la poursuite d'un fantôme inaccessible. En aucune façon, car en raison même de ce qu'il est incessant, nous voyons s'épanouir en nombre sans cesse croissant les fruits magnifiques de cet effort. Les fruits sont, à vrai dire, l'unique preuve que nous sommes dans le bon chemin et que nous nous rapprochons peu à peu et d'une manière permanente du but qui nous attire dans un lointain inaccessible. Ce n'est pas la possession de la vérité, mais une recherche heureusement dirigée vers elle qui fait la joie féconde et le bonheur du savant. De cela les esprits bien faits se sont aperçu depuis longtemps et, bien avant que Lessing l'ait exprimé dans une maxime classique.

II

Le but idéal poursuivi par le physicien est donc la connaissance du monde réel et extérieur, mais, quels que soient les moyens d'investigation dont il dispose et les mesures qu'il effectue, jamais il n'appréhende directement rien de ce monde, Il en accueille seulement de temps en temps des messages plus ou moins incertains. Il reçoit, comme Helmholtz, l'a dit un jour, des signaux qui lui sont adressés par le monde réel et c'est à lui

d'en tirer des conclusions ; sa situation est analogue à celle d'un linguiste ayant à déchiffrer des documents provenant d'un peuple dont la civilisation lui est entièrement inconnue. La première supposition que devra faire ce linguiste sera nécessairement qu'un certain sens raisonnable est inclus dans ce document. Le physicien, lui aussi, doit supposer que le monde réel obéit à des lois, même s'il n'a aucun espoir de jamais arriver à une pleine connaissance de ces lois, pas même de savoir avec certitude quelle en est la nature. Confiant dans l'existence d'un monde réel soumis à des lois, le physicien se bâtit un système de notions et de propositions dit « image représentative physique de l'univers » en faisant appel à toutes les ressources de son savoir et il s'efforcera de donner à ce système une structure telle que, mis à la place du monde réel, il lui adresse, autant que possible, des messages identiques. Dans la mesure où il y parvient, il lui est loisible d'affirmer sans craindre de s'exposer à une réfutation motivée, qu'il est parvenu à connaître au moins un des aspects du monde réel ; bien que, d'autre part, il ne puisse pas non plus donner une preuve de la vérité de son affirmation. Je ne crois pas être présomptueux, en ne cachant pas mon admiration pour le haut degré de perfection auquel l'esprit scientifique des hommes a su porter l'image représentative de l'univers depuis l'époque d'Aristote. Au point de vue positiviste, une telle conception de la physique et, aussi la lutte incessante pour la connaissance du réel, sont des choses qui n'ont aucun sens. Là où il n'y a pas d'objet, il ne saurait être question d'en donner une représentation.

Le rôle de l’univers des physiciens peut donc être caractérisé en disant qu’il doit mettre en relation aussi étroite que possible le monde réel et le monde sensible. Ce dernier est chargé de fournir la matière première nécessaire à la représentation du monde réel et l’élaboration de cette matière consiste essentiellement à débarrasser le complexe de nos impressions physiques de tout ce qui porte la marque de singularités individuelles ; de tout ce qui provient, soit de la structure de nos organes sensibles, soit de celle qui est propre aux instruments de mesure.

L’image représentative physique doit, *a priori* satisfaire à la condition, imposée par la logique, d’être exempte de contradiction interne entre ses diverses parties. Une fois cette condition remplie, toute liberté est laissée à l’artisan dans son travail descriptif. Il jouit d’une autonomie complète et il n’a besoin d’imposer aucune contrainte à son imagination. Ceci ne va pas, bien entendu, sans entraîner une forte dose d’arbitraire et d’incertitude ; c’est pourquoi la tâche du physicien est beaucoup plus difficile qu’il ne pourrait le paraître au premier abord à des esprits simplistes. Le libre pouvoir spéculatif du savant s’introduit déjà, dès sa première démarche qui consiste à intégrer dans le domaine d’une loi unique le résultat de mesures qui lui sont données séparément et sans coordination. Cette tâche est analogue à celle qui consiste à relier par une courbe un certain nombre de points isolés et l’on sait qu’il existe une infinité de courbes passant par chacun de ces points. Même dans le cas où l’on possède un instrument enregistreur doué d’un mouvement continu, qui peut tracer entièrement une

courbe, jamais celle-ci n’est absolument précise, elle sera toujours constituée par un trait plus pou moins épais à l’intérieur duquel un nombre infini de points mathématiques pourront trouver place.

il n’existe aucune recette générale permettant de lever cette indétermination. Dans cet ordre d’idée, pour se tirer d’affaire, on fait toujours appel à des considérations d’un genre bien à part. On s’appuie sur un enchaînement d’idées grâce auquel on échafaude une hypothèse. En raison de cette hypothèse, la courbe cherchée devra satisfaire à un certain nombre de conditions, ce qui permet de choisir une seule courbe parmi une infinité d’autres également possibles. Nous sommes donc en présence d’une démarche intellectuelle, pour laquelle aucune logique n’est suffisante. S’il veut l’accomplir avec succès, le physicien devra posséder deux qualités : une connaissance approfondie de son sujet et une imagination créatrice puissante. Il lui faut, en effet : premièrement, être familier avec toutes sortes de mesures et, secondement, avoir une acuité intellectuelle suffisante pour rapprocher deux mesures différentes sous un point de vue commun.

Toute hypothèse féconde surgit de la combinaison de deux représentations sensibles, de nature différente. L’histoire nous offre de nombreux exemples de ces rapprochements : c’est d’abord Archimède rapprochant la perte de poids de son propre corps plongé dans l’eau de la perte de poids de la couronne d’or du tyran de Syracuse quand elle était immergée. C’est Newton, rapprochant la chute d’une pomme du mouvement de

la lune autour de la terre. Plus tard, on rapprocha le mouvement d’un corps soumis à la gravitation, situé dans une enceinte en état de repos, d’un corps échappant à la gravitation et se trouvant dans une enceinte qui se déplace vers le haut avec un mouvement accéléré. Enfin Bohr rapprocha le mouvement d’un électron autour d’un noyau atomique du mouvement des planètes autour du soleil. Il serait intéressant de suivre, à propos de chaque hypothèse importante de la physique, le détail des rapprochements d’idées auxquels elles ont dû leur naissance. Toutefois il ne faut pas se dissimuler qu’une telle entreprise se heurterait à de grandes difficultés. Les grands génies créateurs n’ont, en général, jamais été disposés, pour des raisons personnelles, à livrer au public le détail des associations d’idées grâce auxquelles ils ont été amenés à formuler leurs hypothèses.

Si l’on cherche à savoir quelle est l’aptitude à être utilisée possédée par telle où telle hypothèse, il n’y a pas d’autre moyen d’y parvenir que de déduire de cette hypothèse les conséquences qu’elle comporte. Ceci est une opération purement logique et même, principalement, mathématique. L’hypothèse y sert de point de départ et son aboutissement est le développement aussi complet que possible d’une théorie. Chaque énoncé de la théorie est ensuite repris à part et mis en rapport avec les mesures. Des résultats favorables ou défavorables de cette confrontation, on tire ensuite un jugement parallèle sur l’hypothèse.

Il y a un fait très remarquable qui n’est pas sans rapport avec cet état de choses : c’est que le progrès de la physique n’est pas une évolution continue au cours de laquelle nos connaissances s’approfondiraient et s’affineraient peu à peu ; il a au contraire un caractère discontinu et, en quelque sorte, explosif. L’apparition de chaque hypothèse nouvelle provoque comme une éruption subite ; elle est un saut dans l’inconnu, inexplicable logiquement. Ensuite sonne l’heure d’une théorie nouvelle qui, une fois venue au monde, se développe d’une façon continue ; mais toujours, en subissant plus ou moins des contraintes extérieures, son sort étant, en fin de compte, réglé par les mesures. Tant que ces dernières lui demeurent favorables, l’hypothèse jouit d’une considération de plus en plus grande et la théorie reçoit une approbation de plus en plus générale ; mais, des difficultés viennent-elles à surgir quelque part à propos de l’interprétation du résultat de mesures, les doutes, les critiques et la méfiance ne tardent pas à s’élever de toute part. Ce sont là les signes de sa mort prochaine et de l’incubation d’une hypothèse nouvelle destinée à remplacer la première et dont le rôle sera, précisément de résoudre la crise et de permettre l’élaboration d’une autre théorie qui, tout en gardant les avantages de l’ancienne, sera exempte de ses défauts. L’évolution de la physique, dans son ensemble et dans chacune de ses branches, est constituée par une succession de cycles du même genre et c’est ainsi qu’elle poursuit son but qui est la connaissance du monde réel. Il suffit d’être au courant des difficultés éprouvées par la belle hypothèse électrodynamique, sur les corps en mouvement due à Lorentz,

par suite de sa confrontation avec les mesures ; il suffit de connaître dans le détail les conflits d'opinion qui se sont élevés à cette occasion, pour apprécier à sa juste valeur le sentiment de délivrance avec lequel fut accueillie la théorie de la relativité. Pour l'hypothèse des quanta, on a aussi éprouvé quelque chose d'analogue, avec cette différence, cependant que la crise n'est pas entièrement passée.

Du moment que le créateur d'une hypothèse a, de prime abord, toute liberté en ce qui concerne la façon d'envisager cette dernière, il lui est entièrement loisible de choisir à sa fantaisie les concepts et les propositions qu'il y introduira, à la condition qu'il n'en résulte pas de contradiction logique. Contrairement à ce que l'on soutient volontiers dans certains milieux de physiciens, il n'est pas exact que l'on ne puisse utiliser, pour l'élaboration d'une hypothèse que des notions dont le sens puisse, *a priori*, être défini par des mesures, c'est-à-dire, indépendamment de toute théorie. En effet, premièrement, toute hypothèse, en tant que partie constituante, de l'image représentative de l'univers, est un produit de la spéculation libre de l'esprit humain et, secondement, il n'y a absolument aucune grandeur qui puisse être mesurée directement. Une mesure ne reçoit, au contraire son sens physique qu'en vertu d'une interprétation qui est le fait de la théorie. Quiconque est tant soit peu familiarisé avec un laboratoire où l'on utilise des instruments de précision peut témoigner que, même dans le cas des mesures les plus directes et les plus exactes, par exemple celles d'un poids ou de l'intensité d'un courant, les résultats ne peuvent être utilisables qu'après avoir subi nombre de

corrections dont le calcul est déduit d’une théorie et par conséquent d’une hypothèse.

Ainsi donc le créateur d’une hypothèse dispose de possibilités pratiquement illimitées, il est aussi peu lié par le fonctionnement des organes de ses sens qu’il ne l’est par celui des instruments dont il se sert. Par l’œil de son intelligence, il perçoit et il contrôle les phénomènes les plus délicats qui se déroulent dans un système physique ; il suit les mouvements de chaque électron ; il connaît la fréquence et la phase de chaque onde ; on peut même dire qu’il se crée une géométrie à sa fantaisie. Avec des instruments purement imaginaires d’une exactitude idéale ; il peut saisir à volonté les moindres modulations du devenir physique. Il peut, en pensée, exécuter les mesures les plus délicates et tirer de leurs résultats les conclusions les plus générales ; ces conclusions n’ont, au moins directement, rien à voir avec des mesures véritables. C’est pourquoi aussi, jamais des mesures ne pourront confirmer ni infirmer directement une hypothèse, elles pourront seulement en faire ressortir la convenance plus ou moins grande.

Voici maintenant le revers de la médaille, l’acuité parfaite de l’œil intellectuel à l’égard de tous les phénomènes qui se passent dans l’univers représentatif des physiciens, résulte uniquement de ce que cet univers est une image du monde réel, image dont ces physiciens sont eux-mêmes les auteurs. D’ailleurs la connaissance intégrale qu’ils en ont et la maîtrise absolue qu’ils possèdent sur elle supposent, au fond, qu’elle

est, de soi, pleinement intelligible. L'hypothèse physique ne saurait donc devenir significative à l'égard de la réalité et recevoir, par là même, ce qui constitue sa valeur propre que par la mise en rapport de la théorie qui en découle avec les résultats des mesures. Certes, comme nous l'avons déjà vu, une mesure, prise en elle-même, est incapable de nous renseigner, tant sur l'image représentative physique de l'univers que sur le monde réel, elle n'est, en effet, qu'un phénomène intéressant les organes sensoriels du physicien et, d'un certain point de vue, l'instrument dont il se sert. La seule chose que nous sachions, c'est que ce phénomène est, de quelque façon, en relation avec le phénomène réel à mesurer. Nous ne connaissons donc, de façon immédiate, le sens d'aucune mesure. La découverte de ce sens est donc, elle aussi, un des objets du travail scientifique, au même titre que l'étude des lois régissant le cours de tout autre phénomène. Pour parvenir à cette connaissance, les méthodes seront les mêmes que partout ailleurs, c'est-à-dire que l'on devra incorporer toutes les particularités du processus de mesure dans l'image représentative de l'univers et s'efforcer de se rendre compte de ce que serait, pour un œil intellectuel idéalement transparent, un ensemble où seraient compris, et les organes sensibles du physicien et ses instruments eux-mêmes.

Ainsi pourrait-on parvenir à se faire une idée au moins approchée des lois qui mettent en relation la mesure et le phénomène à mesurer. Les difficultés de nature gnoséologiques où la physique théorique s'est trouvée récemment quelque peu embarrassée à propos de la théorie des quanta, proviennent semble-t-il, au fond, de ce que l'on a, comme il était trop

naturel, mais non cependant légitime, identifié l'œil corporel du physicien qui effectue la mesure avec l'œil intellectuel du physicien qui spécule, alors que le premier joue le rôle d'objet vis-à-vis du second. Dès lors que toute mesure est inévitablement liée avec une intervention causale, plus ou moins notable, dans le phénomène à mesurer, il est par principe, absolument impossible de séparer complètement les lois des phénomènes physiques des méthodes par lesquelles on les mesure. Pour les phénomènes les plus grossiers, ceux qui englobent une multitude d'atomes, l'influence de la mesure est, il est vrai, négligeable, même si l'on exige une très grande approximation. Aussi la physique ancienne, celle de l'époque classique, a-t-elle pu laisser s'implanter peu à peu l'idée que nos mesures nous permettent d'avoir une connaissance immédiate des phénomènes réels. Mais cette supposition est entachée d'une erreur de principe, diamétralement opposée à celle que le positivisme commet quand il ne considère que les impressions sensibles constitutives des mesures et ignore les phénomènes réels. Ce sont là deux attitudes également injustifiables. Il est tout aussi impossible d'exclure complètement les mesures que de vouloir ignorer les phénomènes réels. La découverte du quantum d'action indivisible a même permis de tracer une limite déterminable numériquement au delà de laquelle aucune mesure physique, quelle qu'elle soit, ne nous donnera jamais le détail des phénomènes réels. Dans ces conditions, la seule conclusion possible est que les questions concernant ces détails n'ont aucun sens physique. Tel est aussi le point où les résultats des

mesures doivent être complétés par la spéculation libre. À cette dernière incombera la tâche d'achever, dans la mesure du possible, la description de l'image représentative physique de l'univers et de parvenir, par là même, à une connaissance plus parfaite du monde réel.

Récapitulons : le progrès de la physique dépend, avant tout, des perfectionnements apportés aux méthodes de mesure et, à ce point de vue, nous sommes entièrement d'accord avec le positivisme. Notre désaccord avec lui consiste en ce que, pour le positivisme, les impressions sensibles constitutives des mesures sont les données élémentaires primitives qui forment le point de départ de toute science. Selon nous, au contraire, dans la physique véritable, les mesures doivent être considérées comme le résultat final plus ou moins complexe d'influences entre des phénomènes ayant lieu dans le monde extérieur et des phénomènes qui se passent dans nos instruments de mesure et dans nos organes sensoriels eux-mêmes. Trouver le fil conducteur qui permette de s'orienter dans un ensemble aussi complexe, est un des buts principaux de la science. C'est pourquoi il importe que toute mesure soit agencée convenablement ; car établir un dispositif en vue d'une mesure, c'est poser une question à la nature.

Mais, pour poser une question raisonnable, il faut nécessairement l'appui d'une théorie raisonnable. Il ne faudrait pas, en effet, se figurer que l'on puisse porter un jugement sur une théorie indépendamment de toute théorie. Il arrive souvent qu'une question qui possède un sens d'après une certaine

théorie en soit dépourvue suivant une autre ; ou bien encore que le sens de la même question change en même temps que la théorie adoptée. Considérons, par exemple, la question de la transformation d'un métal vulgaire, comme le mercure en or. Au temps des alchimistes, cette question avait un sens profond, d'innombrables chercheurs ont sacrifié leur fortune et leur santé à la résoudre. Plus tard quand on admit la théorie de l'immutabilité des atomes, la question perdit son sens et quiconque en recherchait la solution était regardé comme un fou. Aujourd'hui la même question est redevenue d'une actualité aiguë depuis l'adoption du modèle atomique de Bohr, suivant lequel l'atome d'or ne diffère de l'atome de mercure que par la perte d'un seul électron ; et elle a été reprise par les moyens d'investigation les plus modernes. On le voit donc, dans le cas présent, comme dans tous les autres, l'essai prime l'étude. Car les essais qui n'ont obtenu aucun résultat, permettent, à qui les interprète correctement, d'arriver à la connaissance de vérités extrêmement importantes.

Nous avons vu la chimie scientifique sortir d'essais plus ou moins désordonnés effectués dans le but de fabriquer de l'or. Nous avons vu aussi le principe de la conservation de l'énergie sortir du problème insoluble du mouvement perpétuel. De même, les vaines tentatives faites en vue de mesurer le mouvement absolu de la terre, sont au point de départ de la théorie de la relativité. La recherche expérimentale et la recherche théorique sont donc inséparablement unies l'une à l'autre et aucun progrès de l'une n'est concevable sans un progrès correspondant de l'autre.

Certes il est bien tentant, une fois que l’on est parvenu à l’acquisition d’une nouvelle connaissance, de considérer certains problèmes en rapport avec cette découverte, non seulement comme dépourvue de sens, mais encore comme ne pouvant, *a priori* et, d’après une démonstration décisive, avoir aucun sens. Ceci n’est qu’une illusion. En soi, le mouvement absolu de la terre, c’est-à-dire son mouvement par rapport à l’éther, et l’espace absolu de Newton, ne sont pas des concepts dépourvus de sens bien qu’on lise souvent le contraire dans les ouvrages de vulgarisation sur la relativité. Le mouvement absolu de la terre ne devient un non-sens que si l’on admet la relativité spéciale ; et l’espace absolu ne devient un non-sens que si l’on admet la relativité généralisée. Ce sont là des exemples sur lesquels on peut suivre aisément les phases de l’évolution en vertu de laquelle les idées scientifiques, en soi tout à fait légitimes, et enracinées depuis des siècles, au point d’être considérées comme évidentes, ont pu être ébranlées et même disparaître complètement sous les coups de théories nouvelles plus efficaces.

III

La lutte entre opinions opposées n’a même pas épargné ce qui jusqu’à présent était considéré comme le fondement de toute recherche scientifique, je veux dire le principe de causalité. Le principe de causalité s’applique-t-il à tous les phénomènes physiques comme on l’a toujours cru jusqu’ici ; ou bien ce principe n’a-t-il qu’une portée globale et statistique quand on l’applique aux phénomènes les plus délicats de la physique

atomique ? Pas plus du point de vue purement théorique que par des mesures, on ne saurait trancher une telle question. *A priori*, il dépend entièrement du libre arbitre du physicien de faire appel à la causalité dynamique stricte ou seulement à la causalité statistique au cours de ses recherches spéculatives et de l'élaboration de ses hypothèses. La décision viendra uniquement de la façon plus ou moins heureuse dont il se tirera d'affaire. Il n'y a ici, comme toujours, qu'une chose à faire : adopter à titre d'essai un des deux points de vue et voir à quelles conséquences on aboutira, exactement comme nous l'avons fait tout à l'heure quand nous avons examiné la valeur du positivisme. Il est, en principe, indifférent, d'adopter l'un ou l'autre des deux points de vue ; pratiquement, on choisira celui qui semble, *a priori*, être le plus satisfaisant. En ce qui me concerne, je crois préférable d'admettre l'existence d'une causalité stricte, tout simplement parce que ce genre de causalité porte plus loin et plus profondément qu'une causalité statistique qui doit renoncer, de prime abord, à certaines connaissances. Dans une physique statistique, les seules lois qui existent se rapportent à des collections de nombreux événements. Les phénomènes élémentaires sont bien tenus pour existants ; mais il est déclaré *a priori* qu'il n'y a aucun sens à parler de lois applicables à ces phénomènes. Or, c'est là une attitude qui ne me satisfait à aucun degré et je ne vois aucun motif qui puisse me contraindre à abandonner l'hypothèse de l'existence d'une causalité stricte, pas plus dans le monde physique que dans le monde spirituel. Naturellement, la causalité stricte n'est pas immédiatement applicable à la

succession de nos impressions sensibles. Entre des impressions il ne peut jamais exister que des relations de nature statistique ; car, toute mesure, même la plus précise, comporte toujours une erreur fortuite incontrôlable. Mais une impression, considérée objectivement, n'est jamais qu'un phénomène résultant du concours d'un grand nombre d'éléments très divers. Même si chaque élément pris en particulier obéit à une loi causale rigoureuse qui le relie à un autre élément particulier lui succédant immédiatement, il reste possible qu'à une impression sensible bien déterminée, puissent succéder des impressions très différentes ; parce qu'à une impression bien déterminée, peut correspondre un grand nombre de compositions élémentaires différentes.

Pourtant, il est une question à propos de laquelle a pu surgir contre l'acceptation d'une causalité stricte universelle, une objection qui semble, en principe, irréductible : c'est la question du libre arbitre. En raison du haut intérêt qu'elle présente au point de vue humain, je m'y arrête un instant.

Notre conscience, qui est aussi le juge sans appel de toutes nos facultés connaissantes témoigne, en effet, irrécusablement, que nous sommes libres. Cela est-il vrai ? La volonté humaine est-elle libre ou bien obéit-elle à une causalité stricte ? Ce sont là deux thèses qui semblent s'exclure complètement, et comme il semble bien qu'il faille répondre par l'affirmative en faveur de la première ; il en résulterait qu'il y a au moins un cas où il est absurde d'admettre l'existence d'une causalité stricte.

De nombreuses tentatives ont déjà été faites en vue de résoudre ce dilemme et, dans ce but, on s'est souvent efforcé de tracer une limite au-delà de laquelle la loi de causalité ne serait plus valable. Tout récemment, même on s'est appuyé, pour cela, sur le développement de la physique moderne qui serait en faveur d'une causalité purement statistique. Je répète ici, comme je l'ai déjà fait en mainte autre occasion, que cette opinion ne concorde nullement avec ma manière de voir. En effet, si elle était juste, la volonté humaine se trouverait être dégradée au point de n'être plus que l'instrument d'un hasard aveugle. À mon avis, la question du libre arbitre n'a rien à voir avec le contraste qui existe entre la physique causale et la physique statistique ; elle est d'une nature bien plus profonde ; car elle ne dépend d'aucune hypothèse physique ou biologique.

Selon moi, et ici je me trouve être d'accord avec des philosophes célèbres, pour échapper au dilemme, il faut se placer sur un tout autre terrain. Un examen attentif permet, en effet, de se rendre compte que l'alternative posée entre une volonté humaine libre et une volonté régie par la causalité, repose sur une disjonction logique vicieuse ; car les deux cas mis en opposition ne s'excluent nullement. Que veut-on dire quand on affirme que la volonté humaine est déterminée causalement ? pas autre chose que ceci : Toute action humaine, avec les motifs qui l'accompagnent est susceptible d'être connue à l'avance ; mais seulement, bien entendu de quelqu'un qui connaîtrait l'homme auteur de cette action dans ses qualités physiques et morales ; de telle sorte que celui qui voudrait appliquer la loi de causalité aux actes d'un homme, devrait

pénétrer d’un regard d’une acuité absolument parfaite tous les replis de la conscience et de la subconscience de cet homme : autant dire qu’il devrait posséder un regard divin. Or c’est là une chose que nous pouvons et devons concéder. Aux yeux de Dieu, tous les hommes, même les plus grands génies, les Mozart, les Goethe, sont en effet des créatures d’une simplicité rudimentaire. Il a, constamment sous les yeux, ordonnée en une suite impeccable, toute la série de leurs actes, même ceux dont les mobiles sont les plus délicats. Tout cela ne fait d’ailleurs aucun tort à la dignité de ces grands hommes. Mais, ne l’oublions pas, ce serait faire preuve d’une présomption vraiment insensée que de vouloir s’appuyer sur ce qui vient d’être dit pour essayer d’imiter le regard divin et de reproduire le cours des pensées divines. L’intellect humain ne serait pas même en état d’en comprendre les pensées les plus profondes, si elles lui étaient communiquées. C’est pourquoi la doctrine du déterminisme, applicable aux phénomènes spirituels, n’est susceptible d’aucune preuve dans beaucoup de cas : c’est une thèse métaphysique, tout comme la thèse de la réalité du monde extérieur. Mais cette doctrine, si elle ne peut pas être prouvée, ne peut pas davantage être réfutée logiquement ; et son importance ressort suffisamment de ce qu’elle est présupposée à toute investigation scientifique des phénomènes psychiques. Existe-t-il un auteur de biographie qui, recherchant les motifs d’une action importante du personnage qu’il étudie, se tiendrait pour satisfait en l’attribuant au hasard ? S’il ne trouve pas d’explication satisfaisante, il dira plutôt que les sources dont il dispose sont incomplètes ou, s’il est assez

lucide pour cela, il pourra invoquer l'impuissance où il est de pénétrer la mentalité de son héros. Dans la vie ordinaire, il en va absolument de même : notre comportement à l'égard des hommes qui nous entourent suppose que leurs paroles et leurs actions ont toujours des causes bien déterminées, causes qui résident, soit dans ces hommes eux-mêmes, soit dans leur entourage, même si, la plupart du temps, nous ne pouvons pas les connaître.

Demandons-nous maintenant ce que nous entendons quand nous disons que la volonté humaine est libre. Nous répondrons alors simplement ceci : Quiconque, ayant la possibilité d'accomplir deux actions, se sent en lui-même la force de pouvoir se décider à sa convenance pour l'une ou pour l'autre, est libre. Or il n'y a là aucune contradiction avec ce que nous venons de dire plus haut. Il n'y aurait contradiction que si l'homme pouvait posséder, à l'égard de lui-même, la pénétration parfaite du regard divin. Il pourrait en effet, en s'appuyant sur la loi de causalité, prévoir ses propres actes volontaires, sa volonté ne serait donc plus libre. Or la logique, à elle seule, exclue une telle possibilité. Il n'existe pas, en effet, d'œil, si perfectionné soit-il, qui soit capable de se voir lui-même. L'objet et le sujet de la puissance connaissante ne sauraient être identiques. On ne peut parler de connaissance, que si l'objet à connaître n'est pas influencé par ce qui se passe dans le sujet connaissant. La question de la validité de la loi de causalité est donc, *a priori*, dépourvue de sens, en ce qui concerne nos propres actes volontaires, de même qu'il est, *a priori*, dépourvu de sens de se demander si quelqu'un pourrait,

moyennant un effort approprié, se grimper sur le dos ou bien rattraper sa propre ombre à la course.

Ainsi donc, en principe, il est loisible à chacun, dans la mesure de la puissance intellectuelle qui lui aura été départie, d'appliquer la loi de causalité à tous les phénomènes ayant lieu dans le monde qui l'entoure, à la seule condition que, ce faisant, il n'influe pas sur les phénomènes en question ; et ceci exclue évidemment qu'il l'applique à ses propres pensées et actes volontaires. Ces pensées et ces actes sont donc l'unique objet qui, par principe est soustrait à la contrainte causale. Or cet objet constitue justement le trésor le plus précieux que l'homme ait en sa possession et ce dont le bon usage lui importe souverainement pour être heureux et vivre en paix. La loi de causalité est ici incapable de fournir le fil conducteur qui serait nécessaire et il ne faut pas que l'homme compte sur elle pour échapper à la responsabilité morale qui lui incombe en vertu d'une autre loi. Cette autre loi n'a rien de commun avec la première, chacun la porte dans sa conscience, assez facile à connaître s'il veut s'en donner la peine.

C'est donc une dangereuse illusion que de tenter de se débarrasser d'une injonction morale importante, en disant que l'on ne peut se soustraire à une loi naturelle inéluctable. Un être humain qui croit que son propre destin est déterminé à l'avance par la fatalité, un peuple qui écoute les prophètes lui annonçant sa décadence en vertu de lois naturelles, montrent simplement, par là même, qu'ils n'ont pas été capables de

susciter en eux une véritable volonté de monter toujours plus haut.

Nous sommes parvenus ici à un point où la science, elle-même, s’avoue incompétente ; car elle refuse de se laisser entraîner dans des domaines qui ne sont pas le sien. Le fait qu’elle soit capable d’une telle modestie devrait, ce me semble, nous donner une confiance encore plus grande dans les résultats qu’elle a acquis sur son propre terrain. Mais nous voyons aussi que les divers objets de l’activité humaine ne peuvent jamais être entièrement isolés les uns des autres ; car tout se tient de la façon la plus étroite. Nous étions partis d’une science spéciale, la physique, et, en nous occupant de questions purement physiques, nous avons été amenés à dépasser le monde sensible, nous nous sommes trouvés en présence du monde réel qui ressortit à la métaphysique. Ce monde, en raison de l’impossibilité où nous sommes de le connaître directement, nous est apparu comme quelque chose de mystérieux ; mais nos tentatives de le décrire nous ont permis cependant d’en soupçonner la beauté et la profonde harmonie interne. De là nous avons tout naturellement abordé des questions plus hautes : celles qui se posent à tout homme, s’il vient à méditer sérieusement sur le sens de sa propre vie.

Si parmi mes lecteurs il en est qui soient peu familiarisés avec la physique, j’espère leur avoir donné l’impression qu’une science spécialisée, pourvu qu’elle soit cultivée à fond et consciencieusement, est susceptible de faire apparaître au grand jour de précieux trésors d’une grande valeur éthique.

J’espère aussi avoir fait entrevoir que les grandes crises de la culture intellectuelle ne servent, en somme, qu’à préparer, la fusion de tout le savoir humain en une unité d’un caractère de plus en plus élevé.

CHAPITRE X

LA CAUSALITÉ DANS LA NATURE

Les brillants succès obtenus par la physique en ce qui concerne l'approfondissement de notre connaissance de la nature ont suscité pendant un certain temps les plus légitimes espoirs. Mais ceux-ci ont dû être limités en des points essentiels en raison de la façon dont cette science n'évolué récemment.

Le principe de causalité, notamment, sous sa forme classique, n'a plus une portée absolument générale ; car son application au monde des atomes a été finalement un échec. Pour tous ceux qui s'intéressent à la valeur et au sens de la recherche scientifique, rien ne saurait donc être plus urgent que d'examiner à nouveau et de plus près ce qui constitue l'essence propre des lois naturelles.

Il n'est plus de saison aujourd'hui de ranger purement et simplement le principe de causalité au nombre des catégories ; de le considérer comme l'affirmation de l'existence de règles immuables s'étendant à tout le devenir et d'en faire une forme intuitive sans laquelle nous serions hors d'état d'expérimenter quoi que ce soit. Si la thèse de Kant, selon laquelle il y a des catégories conditionnant *a priori* toutes nos expériences, est une vérité sur laquelle le temps n'a pas de prise, il n'en est pas moins vrai qu'elle ne nous dit rien sur le contenu de chacune

des catégories prises à part. Souvenons-nous de la géométrie euclidienne dont les axiomes, considérés par Kant comme faisant partie des catégories, sont regardés aujourd'hui comme des propositions conditionnelles purement restrictives qu'il est non seulement possible, mais encore nécessaire, de rendre moins étroites, Nous comprendrons alors la prudence des physiciens à cet égard. Nous serons donc sans préventions et nous éviterons de nous lier à aucune hypothèse dangereuse ; aussi nous commencerons par rechercher une base sûre et durable pour édifier notre concept de la causalité.

Quand nous parlons d'une relation causale entre deux événements successifs, cette expression signifie évidemment qu'un lien à forme de loi relie ces deux événements dont le premier est appelé cause et le second, effet.

Maintenant, quelle est la nature de cette liaison ? Y a-t-il un critérium infaillible permettant de savoir si un événement naturel donné est conditionné causalement par un autre ? Cette question est vieille comme la science elle-même et le fait qu'elle est encore posée aujourd'hui suffit à montrer qu'une réponse définitive n'y a pas encore été apportée. C'est là une constatation dont il n'y a pas lieu d'être satisfait ; cependant l'idée qu'il ne peut pas en être autrement est de nature à nous apporter quelque apaisement compensateur. Certes, imaginer qu'on puisse jamais parvenir, d'abord à définir la causalité en une formule parfaitement nette et ensuite, en appliquant cette formule, à circonscrire dans la nature le domaine du principe de causalité, a toujours été considéré comme une naïveté ;

mais, aujourd’hui, en raison du tour pris par l’évolution actuelle des sciences exactes, c’est une pure folie. Dans les sciences naturelles positives, comme dans toutes les autres, on ne part pas d’un principe dont on cherche ensuite la réalisation dans le monde qui nous entoure ; on procède d’une façon exactement inverse. Nous autres hommes, dès le jour de notre naissance, et sans y avoir été préparés, sans avoir été consultés, nous sommes implantés dans la vie et, de cette vie qui nous à ainsi été octroyée, il faut que nous nous accommodions, que nous nous y orientions et, pour cela, que nous ordonnions nos impressions en faisant usage de nos facultés intellectuelles innées. Nous le faisons en nous forgeant, vaille que vaille, certains concepts applicables aux événements qui nous ont concerné ou qui nous concerneront. Il va de soi qu’une forte dose d’arbitraire intervient dans l’élaboration de ces concepts : des faits innombrables pris dans toutes les branches de la science seraient là pour nous le confirmer s’il en était besoin. Je me contenterai de mentionner, pour mémoire, que, même en mathématiques, la plus exacte de toutes les sciences cependant, les questions concernant l’origine et la valeur des concepts fondamentaux soulèvent, encore aujourd’hui, des controverses plus violentes que jamais. Si donc il en est ainsi en mathématiques, qui donc pourrait s’attendre à ce qu’il soit facile de donner, de la causalité naturelle, une définition susceptible d’être acceptée par tous les peuples civilisés de tous les temps ?

Pourtant jamais le problème de l’essence et de la légitimité du principe de causalité n’a perdu de son intérêt et, de notre temps

même, cet intérêt s’est fortement accru. Et cela nous amène à soupçonner, qu’avec la notion de causalité, nous touchons à quelque chose de fondamental, à une notion qui est, au fond indépendante des sens humains et de l’intelligence humaine ; qu’il s’agit là d’un principe dont les racines les plus profondes sont à chercher jusque dans le monde réel, dans ce monde qui échappe à l’emprise d’un contrôle scientifique direct. Il serait, en effet, difficile de trouver un esprit assez sceptique pour douter que, même si la terre et tous ses habitants venaient à être anéantis, les phénomènes physiques n’en continueraient pas moins à obéir à leurs lois causales ; alors que, cependant, il n’existe personne qui soit à même de justifier cette affirmation et d’en estimer la portée exacte.

Quoi qu’il en soit, l’unique moyen d’arriver à nous faire une idée de l’essence de la causalité sera d’abord de prendre notre point de départ dans le monde des faits tels qu’ils nous sont donnés, c’est-à-dire dans nos impressions individuelles. Nous élaborerons ensuite ces impressions de façon à les généraliser et à les débarrasser le plus possible de tous les éléments anthropomorphiques qui leur sont inhérents. C’est donc en tâtonnant que nous nous approcherons peu à peu du concept objectif de causalité.

Il résulte des nombreux essais qui ont été effectués jusqu’ici dans le but de résoudre le problème que le plus sûr moyen pour parvenir à se faire une idée approchée de ce qu’est la causalité, consiste à la mettre en rapport avec une faculté que nous avons acquise et fortifiée par un contact incessant avec ce que nous

expérimentons tous les jours : la faculté de prévoir les événements futurs. Nous le savons en effet, la meilleure preuve de l'existence d'un lien de causalité entre deux phénomènes consiste à montrer que l'apparition de l'un de ces phénomènes permet toujours de prédire à l'avance l'apparition de l'autre. Ce genre de preuve était bien connu de l'agriculteur qui voulait démontrer à des paysans incrédules l'existence d'un lien causal entre les engrais chimiques et la fertilité du sol. Les paysans ne voulaient pas croire que la poussée luxuriante du trèfle dans le champ de l'agriculteur était causée par les engrais chimiques et ils cherchaient une explication à ce fait. Le propriétaire du champ eut alors l'idée d'y tracer des bandes étroites en forme de lettres sur lesquelles il répandit de l'engrais, alors que le reste du terrain n'en recevait pas. Qu'arriva-t-il au printemps lorsque, la semence étant levée, chacun put lire, écrite en lettres de trèfle très nettes, la phrase suivante : « ces lettres ont été engraissées avec du gypse ».

Je prendrai donc comme point de départ de toutes les considérations qui vont suivre, cette petite proposition très simple et très générale : « Un événement est conditionné causalement quand il peut être prédit avec certitude. » Remarquons, cependant, que nous entendons seulement dire par là que la possibilité d'une prédiction exacte de l'avenir est un critérium certain de l'existence d'un lien causal ; mais nullement qu'elle s'identifie, en quelque façon, avec ce lien lui-même. Reportons-nous, en effet, à l'exemple bien connu du jour et de la nuit ; quand il fait jour, on peut prédire avec certitude qu'il fera nuit ; on peut donc en conclure que la nuit

est conditionnée causalement ; mais non pas que le jour est la cause de la nuit. D'autre part, il arrive fréquemment que nous admettions l'existence d'un lien causal, même quand il ne saurait être question de la possibilité d'une prédiction exacte. Tel est, entre autres, le cas de la prédiction du temps : la valeur douteuse des prédictions météorologiques est passée en proverbe ; et, cependant, aucun météorologiste ne se résoudra à renoncer à considérer les phénomènes atmosphériques comme déterminés causalement. Nous n'attribuerons donc, à notre point de départ, qu'un caractère provisoire. Pour serrer de plus près la notion de causalité un nouvel approfondissement très notable va donc être nécessaire.

Dans le cas de la météorologie, il y a une idée qui vient tout naturellement à l'esprit, c'est que le caractère douteux de la prévision provient de la complexité de l'objet sur lequel elle porte : l'atmosphère. Si nous isolions une petite partie de l'atmosphère, un litre d'air, par exemple, nous serions déjà beaucoup plus à même de faire des prédictions sur la façon dont celui-ci se comportera vis-à-vis des influences extérieures telles que la compression, l'échauffement, l'humidification, etc. Nous connaissons des lois physiques bien déterminées, nous permettant de prévoir, avec plus ou moins de certitude, le résultat des mesures que nous effectuerons : augmentation de la pression, de la température, condensations, etc.

Mais, à y regarder de plus près, nous aboutissons à une constatation fort intéressante : Quelque simples que soient les

circonstances choisies, quelque précis que soient les instruments dont nous disposions, jamais il ne nous sera possible de calculer à l'avance le résultat d'une mesure avec une exactitude absolue, c'est-à-dire telle que les nombres trouvés par l'expérience et par le calcul coïncident dans toutes leur décimales, Il y a toujours une certaine marge d'incertitude, contrairement à ce qui se passe dans les calculs purement mathématiques où nous voyons qu'il est toujours possible de trouver par exemple √2 avec autant de décimales que l'on voudra. Ce qui est vrai dans le domaine de la mécanique et de la chaleur, l'est également dans toutes les autres branches de la physique, même quand il s'agit de phénomènes optiques ou électriques. L'ensemble de toutes nos expériences nous contraint donc d'énoncer la phrase suivante à titre de vérité de fait bien établie : « En aucun cas, il n'est possible de prédire exactement un phénomène physique. »

Si maintenant nous rapprochons ce fait de la proposition énoncée en premier lieu : un événement est conditionné causalement quand il peut être prédit avec certitude ; nous nous trouvons en présence d'un dilemme très désagréable, mais inévitable : Ou bien nous maintenons la lettre de notre proposition et alors il n'y a pas dans la nature un seul cas où l'on puisse affirmer l'existence d'un lien causal ; ou bien nous maintenons *a priori* l'existence d'une causalité stricte et il devient nécessaire de modifier d'une manière ou d'une autre, la proposition dont nous sommes partis.

Il y a, à l’heure actuelle, un bon nombre de physiciens et de philosophes qui se décident pour la première alternative, je les désignerai sous le nom d’indéterministes. Suivant leur opinion, il n’existe pas de causalité véritable dans la nature, pas de lois rigoureuses. Si nous avons l’illusion qu’il en est autrement, cela provient de ce que l’on peut quelquefois arriver à établir des règles qui s’appliquent avec une approximation très grande ; mais qui n’est cependant pas une exactitude absolue. Par principe, l’indéterministe recherchera une raison statistique à toute loi physique, même à la loi de gravitation, même à l’attraction électrique. Toutes ces lois sont pour lui des lois de probabilité qui se rapportent seulement à la moyenne d’un très grand nombre d’observations de même nature ; toutes ne possèdent qu’une valeur approximative en ce qui concerne chaque observation prise à part, et elles souffrent toujours des exceptions.

La relation entre la pression exercée par un gaz sur les parois du récipient qui le contient et la densité de ce gaz est un bon exemple de loi statistique. La pression exercée par un gaz a son origine dans le bombardement continuel de celle-ci par les molécules du gaz. Ces molécules sont en quantité innombrable, elles sont animées de grandes vitesses et leurs trajectoires sont irrégulièrement orientées dans toutes les directions. Si l’on calcule, sur ces bases, la force totale qui résulte de ce bombardement, on trouve que la pression exercée sur la paroi est sensiblement proportionnelle à la densité du gaz et aussi à la moyenne des carrés des vitesses. Ceci concorde d’une façon satisfaisante avec les résultats des mesures, à condition de

regarder la température comme une mesure de la vitesse des molécules.

L’étude des variations de pression que l’on peut constater quand on considère une portion très petite de la paroi du récipient fournit une confirmation directe de cette théorie. Considérons, en effet, une surface très petite prise sur la paroi, par exemple la milliardième partie d’un millimètre carré, il peut s’écouler beaucoup de temps avant qu’une molécule vienne à la frapper ; mais par contre, il est possible que deux ou trois molécules se succèdent ensuite à des intervalles de temps très rapprochés. Dans ces conditions, il ne saurait évidemment être question d’une pression constante : la pression éprouvera, au contraire, des variations irrégulières. La loi simple ne vaut que pour les grandes surfaces de la paroi qui reçoivent le choc de nombreuses molécules, de telle sorte que les irrégularités se compensent.

Ces variations, provoquées par le choc irrégulier des molécules, peuvent être observées partout où des molécules animées d’un mouvement rapide entrent en contact avec des corps facilement mobiles. Leur principale manifestation est le mouvement brownien, du nom de celui qui l’observa pour la première fois sur des grains de poussière suspendus dans un liquide. Un autre phénomène analogue est le fait qu’une balance très sensible n’est jamais complètement en repos, mais qu’elle exécute sans jamais s’arrêter des oscillations irrégulières autour de sa position d’équilibre.

Les phénomènes de radioactivité sont un autre exemple de lois statistiques. Un corps radioactif émet continuellement une foule de particules chargées positivement ou négativement par suite de la destruction spontanée de ses atomes. Quand on n'envisage que de grands intervalles de temps on peut parler d'une émission continue ; mais s'il s'agit de petits intervalles c'est-à-dire de ceux dont la durée moyenne ne dépassé pas le temps moyen qui sépare l'émission de deux particules, la plus grande irrégularité règne.

En se basant sur ce qui a lieu pour les gaz et pour les corps radioactifs, les indéterministes ramènent, en dernière analyse, toutes lois de la physique à l'action du hasard. Pour eux, le domaine de la statistique enveloppe la nature tout entière et ils se donnent pour but d'édifier la physique sur le calcul des probabilités.

En fait, la physique, jusqu'à présent, s'est bâtie sur un fondement opposé. Elle a choisi la seconde des deux alternatives dont nous avons parlé plus haut, c'est-à-dire que, pour conserver au principe de causalité toute sa rigueur, elle a modifié quelque peu son point de départ : à savoir l'affirmation qu'un événement est considéré comme conditionné causalement, quand il peut être prédit avec certitude. Dans ce but elle a changé légèrement l'acception du mot « événement ». Pour la physique théorique, en effet, l' « événement » n'est pas le processus de mesure, pris en lui-même ; car ce dernier contient toujours des éléments fortuits et accidentels ; c'est un certain phénomène purement imaginaire

qui a lieu dans un monde qui tient la place du monde sensible tel que nous le font connaître directement les organes de nos sens, aidés, au besoin et perfectionnés par l'usage des instruments de mesure. Ce monde est une vue de l'esprit, arbitraire jusqu'à un certain point ; c'est un modèle idéalisé qui a été créé dans le but d'éliminer l'incertitude inhérente à toute mesure réelle et de n'opérer que sur des concepts définis avec une netteté absolue.

Par suite, en physique, toute grandeur mesurable, qu'il s'agisse d'un intervalle de temps, d'une longueur, d'une charge électrique à une double signification, selon qu'on la considère comme étant le résultat immédiat d'une mesure où qu'on la suppose se rapporter à ce modèle appelé par nous « image représentative physique de l'univers ». Dans la première acception, une grandeur doit toujours être considérée comme étant définie d'une manière imprécise ; c'est pourquoi elle ne saurait être représentée par aucun nombre déterminé ; dans la seconde acception, une grandeur est au contraire un symbole mathématique déterminé sur lequel on opère en observant des règles d'une rigueur absolue. Si nous parlons de la hauteur d'une tour calculable au moyen d'une formule trigonométrique, nous entendons qu'il s'agit d'une grandeur parfaitement déterminée. La mesure effective de la hauteur de la tour, par contre, ne nous donne aucun nombre déterminé. Sa hauteur idéale, susceptible d'être calculée exactement, est donc autre chose que sa hauteur mesurée. Il en va exactement de même pour la période d'oscillation d'un pendule, pour l'intensité lumineuse d'une lampe. De même, dans l'image représentative

de l’univers, une constante universelle, comme la vitesse de la lumière dans le vide ou la charge d’un électron, sont autre chose que leur mesure réelle : suivant la première acception, il s’agit de quelque chose qui est défini d’une façon parfaitement nette ; suivant la seconde acception, il s’agit d’une grandeur qui n’est connue qu’avec une certaine imprécision. Cette distinction très nette, entre les grandeurs du monde sensible et les grandeurs de même nom appartenant à l’image physique représentative de l’univers, est indispensable pour l’élucidation de toutes les questions qui s’y rattachent. Toute discussion qui n’en tiendrait pas compte tournerait certainement à vide.

Il est donc absolument faux de dire, comme on le fait parfois, que l’image physique de l’univers ne doit contenir que des grandeurs directement observables. Celles-ci en sont au contraire totalement absentes. On n’y rencontre, en effet, que des symboles et il arrive même quelquefois que cette image représentative contienne des éléments qui n’ont qu’un rapport très indirect ou même pas de rapport du tout avec le monde sensible ; telles sont, par exemple, les ondes de l’éther, les vibrations partielles, les systèmes de référence, etc. Ces éléments apparaissent au premier abord comme des impédimenta ; mais ils sont le prix dont a été acheté l’avantage indiscutable qu’est l’introduction de l’image représentative physique de l’univers. Cet avantage consiste précisément en ce qu’un déterminisme strict a pu être maintenu.

Certes l’image représentative physique de l’univers n’a que la valeur d’un concept auxiliaire. Les faits de l’univers sensible et

leur prédiction aussi exacte que possible restent toujours la seule chose qui importe en fin de compte. Dans la théorie classique les choses se passent de la manière suivante : l'objet à étudier commence d'abord par être choisi dans le monde sensible ; soit, par exemple un système de corps matériels, cet objet sera symbolisé par un système de grandeurs mesurées qui définiront son état ; autrement dit, le système matériel primitif sera transposé dans l'univers représentatif des physiciens et il en résultera un système physique dans un état initial donné. La même opération sera effectuée en ce qui concerne les influences extérieures subies ultérieurement par l'objet en question : ces influences seront donc, elles aussi, représentées par des symboles rentrant également dans le cadre de l'image représentative physique de l'univers.

Nous aurons donc finalement un système de forces extérieures et des liaisons. Grâce à ces données, le comportement du système se trouvera être défini pour tous les temps et il sera calculable avec une précision absolue au moyen des équations différentielles de la théorie. Le calcul effectué fera apparaître les coordonnées et les vitesses de tous les points matériels du système, comme étant des fonctions bien définies du temps. Si, maintenant, pour un instant ultérieur, par une opération exactement inverse, nous retraduisons, en termes de monde sensible, l'ensemble des symboles, empruntés à l'image représentative physique de l'univers, qui correspond à l'état du système à cet instant, nous nous trouverons, en fin de compte, avoir rattaché ensemble deux événements du monde sensible se trouvant dans un rapport de succession temporelle. Une

prévision approximative de l’événement futur, faite en se basant sur la connaissance de l’événement présent, sera donc possible.

En résumé nous pouvons dire que la prévision des événements du monde sensible est toujours plus ou moins entachée d’incertitude, alors que les lois qui régissent l’image représentative physique de l’univers sont toujours déterminées par une causalité stricte. L’introduction de cette image représentative nous permet donc, et c’est ce qui fait son importance, de ramener l’incertitude de toutes les prédictions concernant le monde sensible, aux incertitudes inhérentes, d’une part à la traduction des événements du monde sensible en termes de l’univers représentatif et, d’autre part à l’opération inverse.

La physique classique s’est très peu préoccupée de ce genre d’incertitudes. Toute son attention a été occupée à l’établissement de relations causales entre les phénomènes ayant lieu dans l’univers représentatif des physiciens. Cette attitude lui a valu, il faut le reconnaître, de glorieux triomphes. Elle est parvenue notamment à donner une explication strictement causale des oscillations irrégulières de la pression d’un gaz dont nous avons parlé plus haut ; elle est parvenue aussi à expliquer le mouvement brownien.

Pour les indéterministes, tous ces problèmes sont de pseudo-problèmes. On doit chercher l’absence de régularité derrière toute régularité apparente et la loi à forme statistique est la seule qui soit pleinement satisfaisante par elle-même. Ils se

tiennent donc pour satisfaits, en supposant que le choc de deux molécules, prises à part, et le bombardement des parois du récipient par une seule molécule prise isolément obéissent à des lois purement statistiques. Pourtant il n’y a pas plus de raison à admettre cela qu’il n’y en a à affirmer que la charge des électrons se trouve entièrement à leur surface parce que tous les électrons d’un conducteur se rassemblent à la surface de ce conducteur.

Pour les déterministes, il faut, au contraire, chercher la règle derrière le désordre apparent ; c’est pourquoi ils ont été amenés à fonder la théorie des gaz sur la supposition que le choc de deux molécules obéit à des lois strictement causales. L’établissement d’une théorie répondant à ces désidérata a été la grande œuvre du physicien Boltzmann et c’est une des plus belles réussites de la physique théorique. En effet, la théorie de Boltzmann, non seulement rend compte du fait, vérifié expérimentalement, que l’énergie moyenne des oscillations autour de la position d’équilibre est proportionnelle à la température absolue ; mais encore elle permet, en mesurant ces oscillations, par exemple au moyen d’une balance très sensible, de calculer à l’avance avec une exactitude surprenante, le nombre absolu et la masse des molécules incidentes.

Ce résultat et un grand nombre d’autres, tout aussi brillants, permettaient d’espérer légitimement, qu’avec le temps, l’image représentative physique de l’univers deviendrait complètement adéquate à sa fonction parce que les incertitudes résultant de la transposition de l’univers sensible à l’univers représentatif et,

inversement, de l’univers représentatif à l’univers sensible iraient en s’atténuant de plus en plus, en raison du perfectionnement incessant apporté aux méthodes de mesure. Or, cet espoir a été anéanti d’un seul coup et pour toujours par suite de la découverte du quantum d’action.

Comme la théorie des quanta fait son apparition à propos de l’étude du rayonnement lumineux et thermique, nous débuterons par des considérations se rapportant aux phénomènes de rayonnement.

L’existence de faits nombreux permet d’affirmer qu’un rayon lumineux d’une couleur donnée ne transmet pas son énergie d’une manière continue ; mais que cette énergie, est partagée en particules distinctes appelées « photons » dont la grosseur ne dépend que de la couleur de la lumière. Ces photons sont émis dans toutes les directions, absolument comme dans l’ancienne théorie de l’émanation lumineuse de Newton. Lorsque l’intensité lumineuse est forte, les photons se suivent en rangs si serrés, qu’en pratique, le phénomène ne se différencie pas d’une émission continue, mais quand l’intensité de la source diminue ou quand la source s’éloigne, la densité du rayonnement devient de plus en plus faible et les photons se séparent les uns des autres. L’élément caractéristique du processus est que les gouttes d’énergie ou photons ne deviennent pas plus petites quand le rayonnement diminue, mais qu’elles se font seulement plus rares, leur grandeur demeurant constante.

On s’aperçoit alors que l’application du principe de causalité à un phénomène de ce genre ne va pas sans entraîner de sérieuses difficultés. Considérons, par exemple, un rayon lumineux d’une couleur donnée qui aborde, sous une incidence donnée, une plaque de verre bien plane et bien polie ; une partie de la lumière sera réfléchie et une autre partie, disons le triple pour fixer les idées, sera transmise. L’expérience nous apprend que ce rapport est tout à fait indépendant de l’intensité de la lumière, c’est-à-dire des photons incidents. S’il y a un grand nombre de ceux-ci, par exemple un million, il n’est pas difficile de calculer le nombre des photons réfléchis et des photons transmis. Nous aurons 1/4 de million pour les premiers et 3/4 de million pour les seconds, Mais s’il n’y a plus qu’un seul photon dirigé suivant un pinceau très étroit, nous sommes très embarrassés pour savoir ce qui va se passer ; car la division du photon en quatre, qui est la seule solution naturelle, nous est interdite.

Mais il y a encore bien pire. Dans l’exemple précédent, on pourrait se tirer d’affaire en disant : il existe des circonstances encore tout à fait inconnues de nous qui agissent sur le photon en question et qui permettent de lever l’indétermination quant au trajet que ce dernier va suivre. Mais l’exemple suivant ne permet plus, semble-t-il, aucune échappatoire de ce genre. C’est un fait que certaines couleurs sont réfléchies de préférence à d’autres qui sont surtout transmises. Car si de la lumière blanche tombe sur la plaque de verre, la lumière transmise et la lumière réfléchie sont colorées toutes les deux. Dans la théorie ondulatoire classique de la lumière, ceci

s'explique d'une manière tout à fait satisfaisante en disant que la lumière réfléchie sur la face supérieure de la plaque interfère avec celle qui est réfléchie sur la face inférieure ; c'est-à-dire que ces deux rayons réfléchis se renforcent ou s'affaiblissent mutuellement, suivant que le sommet d'une onde d'un des rayons coïncide avec le sommet ou avec le creux de l'onde de l'autre rayon. La longueur d'onde change avec la couleur et il en résulte des différences dans les interférences des diverses couleurs, différences qui coïncident pleinement avec celles qui sont mesurées expérimentalement. L'expérience d'autre part montre aussi que le même phénomène a lieu pour les intensités lumineuses les plus faibles.

Qu'arrivera-t-il donc si un photon isolé arrive au contact de la plaque ? Ce photon doit nécessairement interférer avec lui-même ; car autrement sa longueur d'onde serait sans influence, or pour interférer avec lui-même, un photon devrait pouvoir se diviser, ce qui est impossible. On voit à quelle impasse nous aboutissons !

La théorie des quanta aboutit à un résultat tout à fait semblable en mécanique. Les particules matérielles les plus petites appelées électrons se comportent en effet, comme les photons ; elles interfèrent avec elles-mêmes. Un électron doué d'une certaine vitesse correspond exactement, à cet égard, à un photon, d'une certaine couleur ; quand il aborde une plaque cristalline, il sera de préférence réfléchi ou réfracté et l'explication complète du phénomène nous est fournie jusque dans les moindres détails par la considération de la longueur

d’onde de cat électron qui correspond à son énergie. C’est pourquoi la question du chemin réellement parcouru par l’électron à partir du moment où il arrive sur la plaque, est un problème qui n’est pas seulement sans solution actuelle ; mais encore véritablement insoluble.

La difficulté principielle qu’il y a à déterminer le lieu d’un électron doué d’une vitesse déterminée, s’exprime d’une manière particulièrement caractéristique dans la physique des quanta au moyen de la relation d’incertitude formulée pour la première fois par Werner Heisenberg. De cette relation, il résulte, entre autres choses, que plus la position d’un électron est connue avec certitude et moins il est possible de mesurer exactement sa vitesse ; l’inverse est également vrai. Ceci peut s’expliquer de la façon suivante : pour mesurer la position d’un électron, il faut que nous le voyions et pour cela, il faut que nous l’éclairions, c’est-à-dire que nous projetions de la lumière sur cet électron. Or les rayons lumineux exercent une certaine poussée sur l’électron, ce qui a pour résultat d’en modifier la vitesse d’une manière incontrôlable. Pour augmenter la précision de la détermination de la position d’un électron, il faudrait diminuer la longueur d’onde de la lumière qui sert à l’éclairer, mais dans ces conditions, le choc dû à cette lumière sera d’autant plus fort et, par suite, la vitesse de l’électron connue avec d’autant moins de certitude.

Ce raisonnement montre qu’il est, par principe, impossible de déterminer à la fois avec une précision aussi grande qu’on le veut, la valeur des coordonnées et la valeur des vitesses des

points matériels, qui sont les éléments fondamentaux de l'univers représentatif de la physique classique. L'établissement d'une physique strictement causale soulève donc des difficultés, en ce qui concerne cet univers. Aussi quelques indéterministes se sont-ils crus autorisés à éliminer définitivement le principe de causalité de la physique. Cependant, un examen plus approfondi, montre que cette conclusion, qui suppose une confusion entre l'univers représentatif des physiciens et l'univers sensible, est pour le moins prématurée. Il existe, en effet, un moyen beaucoup moins héroïque de tourner la difficulté : il consiste à admettre que le problème de la détermination simultanée des coordonnées et de la vitesse d'un point matériel n'a aucun sens physique ; tout de même que celui de la trajectoire d'un photon d'une couleur déterminée. Le principe de causalité ne saurait évidemment être rendu responsable de l'impossibilité qu'il y a de donner une réponse à une question qui n'a pas de sens ; car cette impossibilité doit être rapportée aux seules suppositions qui font que l'on a été amené à se poser la question ; en l'espèce, aux hypothèses concernant l'image représentative physique de l'univers. Puisque le schéma représentatif classique a échoué, la seule conclusion à en tirer, c'est qu'il faut le remplacer par un autre.

Or, c'est bien ce qui a eu lieu effectivement : la nouvelle image représentative de l'univers, celle qui est le fait de la physique quantique, est justement issue du besoin d'établir un déterminisme strict qui soit compatible avec l'existence du quantum d'action. Dans ce but, le point matériel, élément

primordial de l’ancien univers, a été dépouillé de son caractère élémentaire, il s’est dissous, en quelque sorte, dans un système d’ondes matérielles et, seules, les ondes matérielles, sont les éléments du nouvel univers représentatif.

L’univers de la physique des quanta est à celui de la physique classique à peu près dans le même rapport que l’optique ondulatoire de Huyghens à l’optique corpusculaire de Newton. De même que cette dernière réussit dans un grand nombre de cas et échoue dans quelques autres ; de même la mécanique classique ou corpusculaire, n’est plus qu’un cas spécial de la mécanique ondulatoire, plus générale. À la place du point matériel classique, nous trouvons un paquet d’ondes, infiniment étroit, c’est-à-dire un système d’ondes très nombreuses, qui interfèrent entre elles, de telle sorte qu’elles s’annulent dans tout l’espace excepté au lieu où le point matériel se trouve.

Évidemment, les lois de la mécanique ondulatoire sont tout à fait différentes des lois de la mécanique classique du point matériel ; mais ce qui est essentiel, c’est que la grandeur caractéristique des ondes matérielles, la fonction ondulatoire, est complètement déterminée, pour tous les temps et pour tous les lieux par les conditions initiales et par les conditions aux limites. On peut en calculer la valeur en suivant des règles absolument précises, que ce calcul ait lieu en utilisant les opérateurs de Schrödinger, les matrices de Heisenberg ou les nombres de Dirac.

L'introduction de la fonction ondulatoire aplanit la difficulté à laquelle on se heurte, comme nous l'avons déjà dit, quand il s'agit de déterminer le comportement d'un électron qui arrive au contact d'une plaque cristalline. Cet électron se réfléchira-t-il ou bien se réfractera-t-il ? Certes, l'électron ne peut être divisé, mais les ondes, dont il est le substitut, le peuvent. Il en résulte donc la possibilité d'une interférence entre les ondes qui se réfléchissent à la face supérieure de la plaque et celles qui se réfléchissent sur la face inférieure. Cette interférence est même calculable suivant des lois énonçables d'une manière très précise ; alors que le phénomène était auparavant tout à fait incompréhensible.

Comme nous le voyons, le déterminisme qui règne dans la physique des quanta est tout aussi sévère que celui de la physique classique. La seule différence est que les symboles et les calculs sont différents. De plus, dans la physique des quanta, tout comme dans la physique classique, l'incertitude qui règne au sujet de la prédiction des événements ayant lieu dans le monde sensible est ramenée à l'impossibilité d'établir une correspondance rigoureusement précise entre l'image représentative de la physique et le monde sensible ; autrement dit, à l'incertitude, plus ou moins grande, avec laquelle les symboles propres à l'un des deux univers peuvent être transposés dans l'autre.

Le fait qu'on s'est résolument accommodé d'une telle incertitude est bien la meilleure preuve de l'importance qu'il y a à maintenir, envers et contre tout, le déterminisme dans la

constitution de l’univers des physiciens. Pourtant le prix singulièrement élevé auquel a été acheté ce maintien d’une causalité rigoureuse ne saurait échapper à aucun esprit critique. Un examen, même superficiel, suffit déjà à faire apparaître que l’univers de la physique quantique est bien plus éloigné du monde sensible que celui de la physique classique et qu’il est incomparablement plus difficile, en physique quantique qu’en physique classique, de transposer dans le monde représentatif, un événement du monde sensible.

Dans l’ancienne physique, la signification de chaque symbole était évidente : la position, la vitesse, l’énergie d’un point matériel pouvaient être déterminées plus ou moins directement par des mesures, et on ne voyait aucune raison qui s’opposât à ce que l’on admît que la marge d’indétermination inhérente à toute mesure ne pût être réduite au delà de toute limite, par suite des perfectionnements continuels apportés à la technique des mesures. Par contre, la fonction ondulatoire de la physique quantique, n’offre aucun point d’appui pour une transposition immédiate dans le monde sensible. Le mot d’onde lui-même, qui paraît pourtant donner une prise si aisée à notre intuition, a une signification totalement différente de celui qu’il avait en physique classique. Jadis on entendait, sous le nom d’onde, un certain phénomène physique qui était, soit un mouvement perceptible à nos sens, soit un champ électrique alternatif pouvant être mesuré directement. Dans la physique moderne, ce même mot ne désigne plus, jusqu’à un certain point, que la probabilité d’existence d’un certain état. Ce qui se partage quand un électron ou un photon arrive sur une plaque

cristalline et y provoque des phénomènes d’interférence, ce n’est pas l’électron ou le photon lui-même, c’est seulement la probabilité pour qu’un photon indivisible se trouve ici plutôt que là.

Dans le cas seulement où un très grand nombre de photons ou d’électrons sont arrivés au contact de la plaque, cette grandeur peut se traduire par un nombre déterminé de photons ou d’électrons.

Les indéterministes ont précisément trouvé dans ce fait, l’occasion d’une nouvelle attaque contre le principe de causalité et, cette fois, leur effort semblait avoir pour lui toutes les chances de succès ; car, de toutes les mesures que l’on peut effectuer, on ne peut jamais déduire qu’une fonction ondulatoire à signification purement statistique. Heureusement, cette fois encore, les défenseurs d’une causalité stricte ont encore trouvé le moyen de conjurer le péril et c’est un de ceux qui nous ont déjà servi plus haut. Nous voulons dire ceci : c’est qu’il est loisible d’affirmer qu’il est impossible d’essayer de définir un symbole de l’univers représentatif des physiciens, si l’on ne définit pas le procédé par lequel on parvient à cette définition, c’est-à-dire si l’on n’indique pas l’état spécial dans lequel se trouve l’instrument de mesure qui sert à transposer ce symbole dans le monde sensible. On parlera donc d’une influence causale exercée par l’instrument de mesure en question, ce qui signifiera que l’indétermination en présence de laquelle on se trouve provient, au moins pour une part, de ce que, entre la grandeur à mesurer et la façon de la mesurer, il y a

une interdépendance réglée par des lois. Il est bien certain que toute mesure, quelle que soit la façon dont l'on s'y prenne pour l'effectuer, exerce toujours une influence plus ou moins perturbatrice sur le phénomène à mesurer. (Nous rappellerons seulement ici, pour mémoire, l'exemple de l'électron dont la trajectoire sera d'autant plus facilement perturbée que l'on cherchera à l'éclairer de façon à connaître sa position d'une manière plus précise.) Si donc une onde matérielle correspond tantôt à un phénomène, tantôt à un autre, existant dans le monde sensible, cela tient à ce que l'on ne saurait répondre à la question de savoir ce que signifie une onde matérielle en considérant uniquement cette onde, mais seulement en envisageant les actions et réactions mutuelles existant entre l'onde matérielle et l'instrument de mesure.

Grâce à ce détour, nos efforts pour résoudre le problème se trouvent aiguillés sar une tout autre voie : où aboutira-t-elle ? C'est ce qui est, à l'heure actuelle, tout à fait incertain. En tout cas, les indéterministes sont en droit de se demander si l'hypothèse d'une action causale de l'instrument de mesure inclut un sens raisonnable, car nous ne connaissons un phénomène qu'autant que nous le mesurons et toute nouvelle mesure est donc, par là même, une nouvelle action causale, c'est-à-dire une nouvelle perturbation. Il est donc tout à fait impossible par principe, d'isoler un « phénomène en soi » de l'appareil avec lequel on le mesure.

Et pourtant cette objection ne semble pas sans réplique. Tout physicien expérimentateur sait, qu'à côté des méthodes de

contrôle directes, il y a les méthodes indirectes et que les cas où les secondes se montrent très utiles, tandis que les premières échouent, sont nombreux. De plus, je voudrais, avant tout, m'inscrire en faux contre une opinion très répandue à l'heure actuelle. Cette opinion, très plausible au premier abord, c'est qu'une question de physique ne mérite d'être examinée, que si l'on sait, *a priori*, qu'elle comporte une réponse déterminée. Si les physiciens s'étaient toujours conformés à ce précepte, jamais la célèbre expérience de Michelson et Morley, n'aurait été entreprise et la théorie de la relativité n'aurait pas vu le jour. Nous savons tous, combien extraordinairement féconde a été, pour la science, la recherche de la vitesse absolue de la terre, recherche pourtant assez généralement considérée aujourd'hui comme dépourvue de sens. Dès lors, n'est-il pas permis de penser que la recherche d'une causalité stricte, s'appliquant à tout l'univers mérite encore bien davantage d'être poursuivie ? Il n'est nullement exclus, même de nos jours, qu'elle ait une signification profonde et nous savons, d'autre part, qu'elle est prégnante d'une riche moisson de succès pour la recherche scientifique.

Comment parvenir, maintenant à trancher la question. Pour nous, il n'est pas d'autre moyen que le suivant : faire sien un des deux points de vue opposés et voir si, en se basant sur lui, on aboutira à des conclusions heureuses ou inacceptables. C'est pourquoi nous trouvons heureux que les physiciens, s'intéressant à la question, se soient partagés en deux camps, dont l'un penche vers le déterminisme et l'autre vers l'indéterminisme. Autant que je puis m'en rendre compte, à

l’heure actuelle, les indéterministes sont les plus nombreux ; mais c’est là un fait bien difficile à constater et un état de chose susceptible de se modifier avec le temps. Il y aurait d’ailleurs bien place pour un tiers parti occupant, en un sens, une position intermédiaire. Cette opinion consisterait à admettre que certaines notions, comme l’attraction électrique ou la gravitation ont un sens immédiat et que les lois où elles interviennent sont des lois strictes. D’autres notions, au contraire, n’auraient qu’une signification purement statistique à l’égard du monde sensible. Je dois dire que ce point de vue me semble peu satisfaisant parce qu’il manque d’unité, aussi ne m’y attarderai-je pas et je me bornerai à considérer les deux partis extrêmes.

L’indéterministe est pleinement satisfait et juge qu’il n’a plus rien à se demander quand il sait que la fonction ondulatoire de la physique quantique est une fonction de probabilités. De même, à propos du phénomène de radioactivité, il lui suffit de savoir que, par exemple, dans tel composé du radium, il y a, en moyenne, par seconde, un nombre connu d’atomes subissant une dissociation. Il ne se demande pas pourquoi tel atome explose précisément maintenant, alors que son voisin restera intact, peut-être pendant mille ans. Par contre, une loi naturelle bien définie, comme la loi de Coulomb qui régit l’attraction électrique posera à ses yeux un problème non résolu. Il ne pourra en effet, se tenir pour pleinement satisfait qu’à partir du moment où il sera parvenu à déterminer quelle est la probabilité pour que la valeur de la force électrique diffère

d’une quantité donnée de celle qui est calculée en s’appuyant sur la loi de Coulomb.

L’attitude intellectuelle du déterministe est, à tous égards, inverse. Pour lui, la loi de Coulomb possède un caractère de perfection, tel qu’il n’y a définitivement rien à chercher au-delà. La fonction ondulatoire n’est, au contraire, reconnue par lui, comme fournissant la valeur d’une probabilité, qu’à la condition de faire abstraction de l’appareil spécial au moyen duquel l’onde est produite ou analysée. Son effort tendra donc à découvrir des relations à forme de lois strictes entre la fonction ondulatoire et les phénomènes ayant lieu dans les corps auxquels cette fonction se rapporte ou qui réagissent sur elle. Pour y arriver, il lui faut évidemment considérer comme objet de son étude, tous ces corps et la fonction ondulatoire elle-même. Son image représentative de l’univers comprendra donc, non pas seulement le dispositif expérimental tout entier qui sert à produire les ondes matérielles (par exemple une batterie à haute tension, un fil incandescent, une préparation radioactive), mais encore les instruments de mesure qui seront une plaque photographique, une chambre d’ionisation, etc. et tous les phénomènes dont ces appareils sont le siège.

Il ne faudrait pas se figurer que, par là même, le problème se trouve résolu comme par enchantement ; il s’est au contraire compliqué. En effet, isoler une partie quelconque du domaine ainsi considéré, ou la soumettre à une influence externe quelconque, sont choses absolument interdites de par la façon même dont celui-ci a été défini. Aussi ne peut-il exister aucune

méthode d’exploration. Il reste cependant possible, aujourd’hui, d’émettre des hypothèses nouvelles d’un genre spécial se rapportant au déroulement des phénomènes internes dont le domaine en question est le siège, quitte à vérifier ensuite les conséquences de ces hypothèses, mais l’avenir seul pourra nous apprendre jusqu’où il sera possible d’aller dans cette voie. Pour le moment, on ne sait pas quel est le chemin du progrès. La seule chose certaine, résulte de tout ce qui vient d’être dit plus haut ; c’est que le quantum d’action est un terme mis par la nature des choses à l’efficacité des instruments de mesure physiques dont nous disposons actuellement, une barrière infranchissable qui nous empêche et qui nous empêchera toujours de donner une explication causale complète de la nature intime des phénomènes les plus délicats, c’est-à-dire indépendamment de l’origine et des suites de ces phénomènes.

Nous pourrions, semble-t-il, arrêter ici ces considérations. Nous avons, en effet, montré que, le mot « causal » étant pris avec les modifications d’acception reconnues nécessaires, une attitude strictement causaliste n’a aucunement lieu d’être exclue de la physique moderne, bien que d’autre part, on ne puisse pas davantage démontrer *a priori*, que cette attitude est nécessaire.

Toutefois, il y a une objection qui surgit, d’autant plus forte que l’on est un déterministe plus convaincu, qui empêche de tenir pour pleinement satisfaisante une causalité du genre de celle dont il vient d’être question. À supposer, en effet, que la

physique puisse continuer à se développer normalement en adoptant le point de vue nouveau sur la causalité, ce dernier n’en est pas moins, par principe, entaché d’une défectuosité capitale. Pour pouvoir continuer à être déterministes, nous avons dû substituer au monde sensible, le seul qui nous soit immédiatement donné, une image représentative qui n’est qu’une création de l’imagination humaine, création dont le caractère est essentiellement changeant et provisoire. C’est là évidemment, un expédient qui s’accorde mal avec le caractère de notion fondamentale qu’il convient d’attribuer au principe de causalité. Il est alors impossible d’éluder la question, de prévoir s’il n’existerait pas un moyen de donner à ce principe une signification plus immédiate et plus profonde, grâce à laquelle il deviendrait indépendant de l’introduction d’une construction artificielle et s’appliquerait, non plus à l’univers purement représentatif des physiciens ; mais aux événements du monde sensible lui-même,

Notre point de départ — à savoir la proposition d’après laquelle un événement n’est conditionné causalement que s’il peut être prédit avec certitude — doit, il est vrai, être maintenu ; car, sans ce point de départ, nous ne saurions rester fidèle à notre principe de nous appuyer sur des faits réels ; et, d’autre part, il nous faut aussi, pour la même raison, reconnaître qu’en aucun cas, il n’est possible de prédire un événement quel qu’il soit. Nous devrons donc comme nous l’avons fait plus haut, apporter une modification à la première proposition ; mais ce pourra être une modification tout à fait

différente de celle que nous avions déjà apportée et même, peut-être, en un certain sens, opposée.

Ce que nous avions changé la première fois, c’était l’objet de la prédiction à savoir l’événement. Les événements ont été considérés comme concernant, non point le monde sensible directement connu de nous, mais un monde fictif artificiel. Grâce à cet expédient, nous avons acquis la possibilité de prédictions exactes ; mais nous pouvons aussi, modifier le sujet de la prédiction, c’est-à-dire l’esprit de celui qui prédit au lieu de modifier son objet. Toute prédiction suppose, en effet ces deux termes : objet et sujet. Nous allons donc reporter, dans ce qui va suivre, notre attention sur le sujet dans son acte de prédiction et nous laisserons, d’autre part, à l’objet de la prédiction, son caractère d’être constitué par les événements du monde sensible et non plus par une image artificielle de l’univers.

Tout d’abord, nous constatons que la certitude de la prédiction dépend dans une large mesure de l’individualité de celui qui l’a fait. Reportons-nous, encore cette fois, à l’exemple de la prédiction du temps. Une prédiction faite par un ignorant, ne sachant rien de la pression barométrique, à l’instant actuel, rien de la température, de l’humidité de l’air, sera tout à fait différente d’une prédiction faite par un cultivateur intelligent en possession des données ci-dessus et qui est à même de puiser au trésor d’une riche expérience. Autre sera encore la prédiction d’un météorologiste qui, en plus des données locales, dispose de nombreuses cartes soigneusement annotées

et intéressant de vastes régions. Voici donc une série de prédictions dont le caractère de certitude va en croissant quand on passe de l'une à l'autre. Dans ces conditions, il est donc tout naturel de penser qu'un esprit idéal qui connaîtrait tous les phénomènes physiques d'aujourd'hui, jusque dans leurs moindres détails, pourrait prophétiser avec une certitude absolument parfaite, toutes les particularités du temps qu'il fera demain. Et il en irait de même pour tout autre sorte de phénomène.

Cette hypothèse est, en quelque sorte, une extrapolation, une généralisation ; il est impossible d'en démontrer le bien-fondé par voie de déduction logique ; mais il est tout aussi impossible de la réfuter *a priori*. Il ne faut donc pas la juger selon son contenu de vérité, mais selon sa valeur d'utilité. En se plaçant à ce point de vue, l'impossibilité où nous sommes de pouvoir formuler aucune prédiction exacte, aussi bien en adoptant les idées de la physique classique que celles de la physique quantique, nous apparaîtra comme une conséquence naturelle de ce fait que l'homme, avec ses organes sensoriels et ses instruments de mesure, est lui-même une partie de la nature, soumise, par conséquent à ses lois. Il est impossible de se placer en dehors d'elle ; alors que pour un esprit idéal, il n'existe aucune limitation de cette sorte.

On pourrait, certes, nous opposer que cet esprit n'est qu'une construction mentale et qu'en fin de compte, notre cerveau lui-même se compose d'atomes obéissant aux lois physiques ; mais un peu de réflexion nous montre que cette objection ne

tient pas debout. Il est, en effet, indubitable que nos pensées peuvent nous mener très loin des lois naturelles connues de nous et que nous pouvons concevoir des phénomènes qui n'ont rien à voir avec la physique réelle. On ne saurait pas davantage affirmer que l'esprit idéal dont nous parlons ne peut exister que dans la pensée humaine et qu'il a son existence liée à celle de l'esprit pensant, car pour être logique il faudrait admettre aussi que le soleil, que le monde extérieur tout entier, ne peuvent exister que dans nos sens et, pourtant tout homme raisonnable est convaincu que le soleil ne perdrait pas la moindre fraction de son éclat, même si le genre humain tout entier venait à être exterminé. Nous croyons à l'existence d'un monde extérieur réel, bien que ce monde se dérobe à toute emprise directe de notre part. De même, rien ne saurait nous empêcher de croire à l'existence d'un esprit idéal, alors que nous savons néanmoins que cet esprit ne pourra jamais être un objet faisant partie du domaine de la recherche scientifique.

D'ailleurs nous devons bien nous garder de considérer cet esprit comme analogue en quelque façon à notre propre esprit ; nous ne lui demanderons pas comment il se procure les connaissances grâce auxquelles, il peut prédire exactement les événements futurs. Au questionneur trop curieux, il pourrait bien arriver de s'entendre répondre : « Tu ressembles à l'esprit que tu es capable de comprendre et non pas à moi » et si, malgré cette réponse, cet homme s'obstinait à repousser l'idée d'un esprit idéal, non plus comme illogique, mais comme insignifiante et superflue, on pourrait toujours lui opposer que les propositions se dérobant à toute logique ne sont pas pour

cela toutes inutiles à la science. Un formalisme aussi peu clairvoyant serait bien propre à faire tarir la source où les grands physiciens, les Kepler, les Galilée, les Newton ont puisé leur ardeur dans la recherche. Pour tous ces hommes, le dévouement à la science a été, consciemment ou non, la conséquence d'une croyance inébranlable à l'existence d'un ordre raisonnable dans le monde.

Certes, une telle croyance ne se commande pas, pas plus qu'on ne peut imposer la vérité et interdire l'erreur. Cependant le seul fait que nous soyons en état de soumettre les événements futurs à nos pensées ne serait-il pas, une énigme incompréhensible s'il ne nous permettait, au moins, de soupçonner l'existence d'une harmonie entre l'esprit humain et le monde extérieur ? La question de savoir si cette harmonie est plus ou moins profonde, si elle s'étend à un domaine plus ou moins vaste est, logiquement parlant, d'importance secondaire. En tout cas, l'harmonie la plus complète, et par là même, la causalité la plus stricte, trouvent leur couronnement dans l'hypothèse d'un esprit idéal pénétrant à fond les secrets des forces naturelles et aussi les phénomènes de la vie psychique, qu'il s'agisse en tout cela du passé, du présent ou de l'avenir.

Qu'advient-il alors du libre arbitre de l'homme ? Est-ce que cette hypothèse ne le supprime pas en dégradant l'homme au point d'en faire un automate exsangue ? Ceci est une question trop pressante et trop importante pour que je puisse me dispenser de prendre ici brièvement position à son égard. À mon avis, il n'y a pas la moindre contradiction à admettre

simultanément l’existence d’une causalité stricte, entendue comme nous venons de le faire, et l’existence d’une volonté humaine libre. Le principe de causalité, d’une part, et le libre arbitre d’autre part, sont en effet des questions de nature essentiellement différente. L’hypothèse d’un esprit omniscient est, nous l’avons vu, nécessaire à la compréhension d’un devenir régi par une causalité stricte ; la question du libre arbitre est une question qui s’adresse à notre conscience personnelle ; notre propre témoignage est donc seul à pouvoir la trancher. Affirmer que l’homme est doué de libre arbitre, c’est, tout simplement, dire qu’il a le sentiment intime d’être libre. Lui seul est donc à même de dire s’il en est bien ainsi. Or rien de tout cela ne s’oppose à ce que les motifs qui le poussent à agir soient parfaitement connus d’un esprit idéal. Se sentir, pour cela, diminué dans sa dignité morale, c’est oublier le niveau suréminent où se situe l’esprit idéal dont il est question, si on le considère par rapport à l’intelligence humaine.

La preuve la plus frappante qui puisse être donnée de l’inapplicabilité du principe de causalité à notre propre volonté, consiste à essayer de prédire nos actes et leurs motifs en se basant sur ce même principe. Nous savons *a priori*, qu’une telle tentative est vouée à un échec total. En effet, toute application du principe de causalité à notre propre volonté, agit en raison des connaissances nouvelles qu’elle nous apporte, comme un motif d’action et, par suite, modifie le résultat cherché ; et ceci peut se poursuivre indéfiniment. Attribuer l’impossibilité où nous sommes de donner une explication purement causale de nos actes à un manque de pénétration

intellectuelle, défaut que les progrès de la culture pourraient arriver à supprimer, est donc une grave erreur. Il y a en physique, une erreur tout à fait parallèle, c'est celle qui consisterait à expliquer l'impossibilité où nous sommes de déterminer simultanément la position et la vitesse d'un électron par l'imperfection de nos méthodes de mesure. De même, l'impossibilité de donner une explication causale de nos actes futurs, ne résulte pas d'un manque de pénétration ; mais simplement de ce que, pour étudier un objet, il ne convient pas de se servir d'une méthode par laquelle cet objet est modifié.

L'homme pensant ne pourra donc jamais trouver dans le principe de causalité un motif suffisant de décision pour son activité volontaire. Il devra faire appel à une autre loi : la loi morale ; mais, avec cette loi, nous sommes sur un tout autre terrain où il n'est pas possible d'accéder par la méthode scientifique.

La pensée scientifique requiert toujours que le sujet pensant et l'objet pensé soient distants l'un de l'autre. Or, cette distance, c'est dans l'hypothèse d'un esprit idéal, toujours sujet, jamais objet, qu'elle sera le mieux observée.

Mais, dira-t-on, cette interdiction de faire de l'esprit idéal un objet pour notre pensée, ne constituerait-elle pas un renoncement peu satisfaisant et ne serait-ce pas payer trop cher le maintien du déterminisme ? À cette objection, je répondrai que ce prix est bien moins élevé que le prix dont les indéterministes devraient payer l'application de leurs idées sur la constitution de l'univers. Les indéterministes sont, en effet,

obligés de mettre encore beaucoup plus tôt, un terme à notre appétit de connaissance, car ils renoncent, *a priori*, à établir des lois même quand il s'agit de cas particuliers.

Une telle dose de résignation est si étonnante que l'on peut se demander pourquoi il y a aujourd'hui tant de physiciens dans le camp des indéterministes. Si je ne m'abuse, c'est sur le terrain psychologique qu'il faut chercher l'explication de ce fait. Toutes les fois qu'une idée nouvelle très importante apparaît dans la science, elle est soumise aux épreuves les plus diverses et, si elle s'est montrée féconde, on s'efforce d'en faire le fondement de tout un enchaînement systématique d'idées, aussi général et aussi parfaitement clos que possible. Ainsi en a-t-il été de la théorie de la relativité et c'est ce qui a également lieu, à l'heure actuelle pour la physique des quanta.

Les principales manifestations de cette physique se trouvent actuellement groupées autour de la fonction ondulatoire, on cherche à donner à cette fonction une importance prépondérante. Or, la fonction d'onde ne concerne que la valeur d'une probabilité, c'est pourquoi on est porté à considérer la recherche de la probabilité comme la tâche qui incombe, avant tout, au physicien. La notion de probabilité acquiert ainsi une importance primordiale ; elle devient le fondement de toute la physique.

Je ne crois pas qu'à l'avenir on se montre toujours aussi satisfait de cette manière d'envisager les choses. Les lois de l'esprit possèdent en effet un caractère de probabilité encore bien plus accentué que les lois physiques, et cependant, en

psychologie, on ne considère aucun événement comme expliqué d’une façon tout à fait scientifique tant qu’on ne lui a pas trouvé une cause initiale. Il est donc à présumer qu’il sera encore bien plus difficile d’éliminer définitivement la causalité des sciences naturelles positives.

Le principe de causalité ne peut pas plus être prouvé qu’il ne peut être réfuté : il n’est donc, à proprement parler, ni vrai ni faux. C’est un principe heuristique, un guide, et à mon avis, le guide le plus précieux que nous ayons pour explorer le chaos si touffu des événements qui ont lieu dans la nature et pour nous indiquer la voie dans laquelle la recherche scientifique doit s’avancer pour arriver à des résultats féconds. Le principe de causalité s’empare de l’âme de l’enfant à son premier éveil et il lui met sur les lèvres son éternel « pourquoi ». C’est aussi ce principe qui accompagne toute la vie du savant et lui pose continuellement de nouveaux problèmes à résoudre.

Qui dit « science » ne dit pas, en effet, repos contemplatif dans la possession d’une connaissance certaine déjà acquise ; mais, bien plutôt, travail infatigable et marche incessante en avant vers un but dont nous avons bien le pressentiment, en quelque sorte divinatoire, mais à la possession complète duquel notre raison n’est jamais capable d’arriver complètement.

CHAPITRE XI

ORIGINE ET ÉVOLUTION DES IDÉES SCIENTIFIQUES

La science, à la considérer objectivement, se présente comme un tout, ayant son unité interne. Il se trouve, il est vrai, qu'elle est divisée en spécialités ; mais cette division n'est pas fondée sur la nature des choses, elle provient seulement de ce que l'esprit humain est borné et que, par suite, une division du travail lui est indispensable. En fait, il y a une chaîne continue qui, partant de la physique et de la chimie, par l'intermédiaire de la biologie et de l'anthropologie, aboutit aux sciences sociales et à la psychologie et, nulle part, ce lien ne saurait être rompu si ce n'est arbitrairement. Les méthodes, elles-mêmes, du travail scientifique, dans les différentes branches du savoir, se révèlent comme étroitement apparentées à qui les regarde de près ; seules les adaptations à leurs objets spéciaux font qu'elles semblent la manifestation d'activités différentes. Les pages les plus récentes de l'histoire des sciences n'ont certes pas peu contribué à faire ressortir cette affinité des diverses sciences spéciales, et cela, pour le plus grand bien, tant interne qu'externe de la science, c'est-à-dire en tant que cette dernière est considérée en elle-même ou dans son rayonnement extérieur. Je crois donc opportun de faire porter les considérations générales qui vont suivre sur tout l'ensemble

des sciences et ceci n’exclut évidemment pas que si je suis amené à faire des applications particulières je les choisirai de préférence dans le domaine qui m’est familier.

Quelles sont les caractéristiques d’une idée scientifique et comment naît-elle ? En posant cette question je ne pense cependant pas à faire une analyse détaillée des phénomènes psychologiques subtils qui se passent dans l’esprit du savant et qui sont d’ailleurs, pour la plus grande part, inconscients. Ces choses sont des secrets divins ne pouvant être dévoilés que jusqu’à un certain point et ce serait une témérité folle que de chercher à les pénétrer. Nous prendrons donc notre point de départ dans ce qui se manifeste extérieurement et nous nous bornerons à examiner les idées qui ont exercé une influence sur l’évolution d’une science ; nous nous enquerrons de la forme sous laquelle elles se présentèrent tout d’abord et de la portée qui leur fut attribuée initialement.

Si nous faisons un examen de ce genre, nous en tirons une règle générale : c’est que toute idée scientifique, surgie du cerveau d’un savant, se rattache à un événement concret, à une découverte, à une observation ou à une constatation, qu’il s’agisse d’une mesure physique ou astronomique, de la découverte d’un manuscrit ou de la mise à jour des monuments d’une civilisation disparue. L’idée scientifique consistera à rapprocher l’événement concret en question d’autres événements déjà connus. Cette idée sera donc comme un pont mettant en relation des faits jusqu’alors sans cohésion. La fécondité d’une idée et, par conséquent, son efficacité au point

de vue scientifique, dépendra alors de la possibilité de généralisation de la relation ainsi découverte et de son extension à toute une catégorie de faits analogues. L'ordre résulte, en effet, de relations entre les choses, grâce auxquelles il devient possible d'acquérir une idée plus simple et plus parfaite de l'univers. L'acte de poursuivre jusqu'au bout Le développement d'une idée a pour principal effet de conduire à se poser de nouvelles questions et de préparer la voie à de nouveaux succès. Ceci se vérifie aussi bien en ce qui concerne l'édification des hypothèses du physicien, que l'exégèse du philologue.

Je vais maintenant entrer un peu plus dans le détail et préciser le sens de ce que je viens de dire ; mais je pense qu'il me sera permis de me cantonner dans le domaine qui m'est familier en ma qualité de physicien. Évidemment, de ce fait, j'adopte un point de vue plus restreint ; mais cet inconvénient sera compensé par la possibilité d'être plus net dans mes exposés.

L'histoire de la découverte de la gravitation par Isaac Newton va nous fournir notre premier exemple, bien classique, de la naissance d'une grande idée scientifique. Newton était assis, nous le savons tous, sous un pommier quand il vit une pomme tomber ; cela le fit penser au mouvement de la lune autour de la terre. Il rapprocha, en même temps, l'accélération du mouvement lunaire de l'accélération de la chute de la pomme. Le fait que ces deux accélérations sont en raison inverse du carré de la distance à la terre, lui donna l'idée de leur assigner

une cause commune, et c’est ainsi qu’il trouva le fondement de toute sa théorie.

James Clerk Maxwell compara la mesure de l’intensité d’un courant, faite en appliquant les lois de l’électromagnétisme à la même mesure exécutée en utilisant les lois de l’électrostatique, et il remarqua que ces deux grandeurs sont entre elles dans un rapport égal à la vitesse de la lumière. De là il fut amené à l’idée que les ondes électromagnétiques et les ondes lumineuses sont d’une seule et même espèce.

Nous le voyons, toute nouvelle hypothèse, faisant son apparition dans la science, peut être caractérisée en disant qu’elle est une combinaison originale de deux séries de faits de natures différentes. Pour chaque théorie, nous pourrions citer des exemples qui seraient analogues aux précédents, bien qu’il y ait aussi des différences, tant dans la manière dont les rapprochements ont été formulés que dans la portée qu’ils ont eue. Ces différences correspondent à des diversités qui apparaissent dans l’évolution et dans le destin des idées scientifiques quand on passe de l’une à l’autre. Il y a des idées qui, après un temps plus ou moins long, deviennent le bien commun de toute la science, à un tel point qu’elles sont considérées comme allant de soi et qu’on ne croit même plus nécessaire de les mentionner comme allant de soi. Les deux idées dont j’ai parlé plus haut sont de cette sorte : je veux dire l’idée de Newton assimilant l’accélération lunaire à l’accélération de la chute des corps situés sur la terre et l’idée de Maxwell selon laquelle la lumière est de nature

électromagnétique. La seconde idée a mis, il est vrai, beaucoup plus de temps à être universellement admise, notamment en Allemagne. Nous savons en effet que, dans ce pays, elle ne fut d'abord guère appréciée parce que la théorie de Weber sur les actions instantanées à distance y était généralement admise. Il a fallu attendre les expériences géniales de Hertz sur les oscillations électriques ultrarapides pour qu'elle reçoive du monde savant l'assentiment unanime qu'elle méritait.

Que les ondes sonores soient de nature mécanique et que les rayons calorifiques soient identiques aux rayons lumineux, ce sont là deux idées incorporées maintenant d'une façon durable à la science. Si l'on se contente aujourd'hui d'en dire un mot dans l'enseignement de la physique, on ne doit pas oublier cependant qu'elles n'ont pas toujours été considérées comme allant de soi. La dernière de ces idées, notamment, celle de l'identité du rayonnement lumineux et du rayonnement thermique, a soulevé des controverses ardentes qui ont duré des années. Chose curieuse, le savant qui a fait le plus pour faire triompher la cause de cette identité, le physicien italien Macedonio Melloni, fut d'abord un de ses adversaires. Nous avons là un exemple très instructif pour nous montrer que la valeur scientifique d'expériences précises est indépendante de leur interprétation théorique.

Contrairement à celles dont nous venons de parler, la plupart des idées n'ont pas été formulées du premier coup sous leur forme parfaite et elles n'ont pas continué d'avoir cours sans subir des modifications qui font que leur histoire est très

mouvementée. Nous les voyons souvent prendre peu à peu une forme précise. Elles deviennent alors un instrument de travail fécond, puis elles retombent dans l'oubli, à moins qu'elles ne subissent des transformations plus ou moins profondes. Il arrive, d'ailleurs, très fréquemment, qu'elles opposent une certaine résistance aux efforts qui sont faits pour les transformer, résistance d'autant plus obstinée qu'elles ont connu antérieurement plus de succès ; cette résistance va même jusqu'à entraver sérieusement le progrès scientifique. La physique nous offre des exemples suffisamment intéressants de luttes de ce genre pour que nous nous y arrêtions un peu.

Je commencerai par m'occuper des idées qui se rapportent à la nature de la chaleur.

La calorimétrie a été la première étape du développement de la théorie de la chaleur ; or cette technique doit son origine à l'idée que la chaleur se comporte comme une matière subtile qui passe des corps chauds dans les corps froids en contact avec eux, la quantité totale de matière subtile restant constante dans ce passage. Cette hypothèse se vérifie très bien toutes les fois qu'aucune action mécanique n'entre en jeu. Il y a bien des difficultés pour expliquer comment il se dégage de la chaleur quand on exerce un frottement sur un corps ou quand on le comprime ; mais on peut s'en tirer en admettant que la capacité calorifique d'un corps est susceptible de varier. La chaleur serait en quelque sorte exprimée d'un corps par l'effet de la compression, un peu à la façon d'une éponge humide que l'on presse ; on voit alors l'eau s'écouler, mais la quantité totale

n’en reste pas moins la même. Plus tard, en raison de l’invention des machines thermiques, la question des lois qui régissent la production du travail par le moyen de la chaleur devenant de plus en plus pressante, Sadi Carnot assimila la production d’un travail à l’aide d’une source de chaleur à la chute d’un corps engendrant du travail sous l’action de la pesanteur. De même que la chute d’un poids d’un niveau élevé vers un autre plus bas peut être utilisée pour fournir du travail, de même la chute de la chaleur d’une température élevée vers une autre plus basse peut aussi produire du travail. Et de même que le travail dû à la gravitation est proportionnel au poids qui tombe et à la hauteur de la chute, de même aussi le travail produit par la chaleur est proportionnel à la quantité de chaleur transmise et à la différence de température.

Cette théorie substantialiste de la chaleur fut d’abord ébranlée une première fois quand il fut constaté expérimentalement que la capacité calorifique d’un corps ne peut pas être modifiée notablement par le frottement ni par la compression, et elle reçut le coup de grâce par suite de la découverte de l’équivalence mécanique de la chaleur et du travail, équivalence en vertu de laquelle, par le frottement de la chaleur se perd et par la compression de la chaleur est engendrée. À la lumière de ces faits, l’ancienne idée de la chaleur apparaît comme simplement absurde, c’est pourquoi il devint absolument nécessaire de reprendre par la base toute la théorie. Rudolph Clausius se consacra à cette tâche et donna la solution du problème dans une suite d’écrits, aujourd’hui classiques, où il expose le second principe de la thermodynamique. L’idée

fondamentale qui est à la base de tout le travail de Clausius, c’est qu’il y a des phénomènes irréversibles ; c’est-à-dire des phénomènes dont le sens ne peut être renversé par aucun moyen. Parmi ces phénomènes il faut compter la conductibilité thermique, le frottement, la diffusion.

Cependant l’idée de Carnot, suivant laquelle le transport de la chaleur d’un corps chaud vers un corps froid est équivalent à la chute d’un poids d’un niveau élevé vers un autre inférieur, fut loin d’être facile à évincer. Il y eut des physiciens qui regardèrent les idées de Clausius comme obscures et inutilement compliquées. Ces physiciens se refusaient, notamment, à accepter l’idée de l’irréversibilité de la chaleur parce qu’on en faisait par là une catégorie à part de l’énergie, et ils créèrent ce qui fut appelé « l’énergétique » dans le but de faire pièce à la thermodynamique de Clausius. Pour les énergétistes, comme pour Clausius, le premier postulat est toujours celui de la conservation de l’énergie ; mais leur second postulat qui, selon eux donne le sens de toute transformation, met en parallèle le transport de la chaleur d’un corps chaud vers un corps froid avec la chute d’un corps d’un point élevé vers un autre plus bas, et avec le passage d’une quantité d’électricité d’un potentiel élevé à un autre inférieur. L’irréversibilité présupposée par Clausius à la démonstration du second principe de la thermodynamique fut donc déclarée par eux un aspect accessoire du phénomène et, par voie de conséquence, l’existence du zéro absolu de l’échelle des températures fut également contestée ; car, de même que l’on ne connaît que des différences de niveau et des différences de

potentiel, on ne connaît aussi que des différences de température.

Dans une telle assimilation, on passe complètement sous silence ou l'on considère comme négligeable, une différence, pourtant capitale, entre les deux catégories de phénomènes : dans le cas d'un pendule qui s'abaisse, la position d'équilibre est dépassée et le pendule oscille de part et d'autre ; de même aussi dans le cas d'une étincelle qui éclate entre deux conducteurs, il y a des oscillations électriques. Dans le transport de chaleur au contraire, il n'y a aucune oscillation de la chaleur.

Dans les années quatre-vingt-neuf et quatre-vingt-dix du siècle dernier, une expérience personnelle m'a appris ce qu'il en coûte à un chercheur, en possession d'une idée à laquelle il a mûrement réfléchi, de vouloir la propager. Il a constaté combien les meilleurs arguments qu'il produisait dans ce but pesaient peu, parce que sa voix n'avait pas l'autorité suffisante pour s'imposer au monde savant. À cette époque, il était vain d'essayer de contrecarrer les Wilhelm Ostwald, les Georg Helm, les Ernst Mach.

Un renversement de la situation devait cependant se produire, mais il eut lieu sur un tout autre terrain ; ce fut l'intrusion de l'atomistique qui le provoqua. L'idée d'atome se perd dans la nuit des temps, mais la première formule utilisable qui en fut donnée se trouve dans la théorie cinétique des gaz. Cette théorie a vu le jour sensiblement à l'époque où fut découvert l'équivalent mécanique de la calorie. Elle fut d'abord

énergiquement combattue par les énergétistes et elle dut commencer par mener une existence modeste. Mais à la fin du siècle dernier, les progrès de la technique expérimentale lui donnèrent une grande force d'expansion. D'après la théorie atomique, le transport thermique d'un corps chaud vers un corps froid ressemble, non à la chute d'un poids, mais à un phénomène de mixtion, c'est-à-dire à ce qui se passe quand on mélange deux poudres superposées dans le même récipient en agitant ce dernier. On ne voit pas alors la poudre passer par des états oscillant de la séparation complète au mélange parfait, la transformation s'effectue, au contraire, en une seule fois et elle a lieu dans un sens déterminé, toujours le même, qui est de la séparation vers le mélange. Le mélange une fois effectué reste indéfiniment dans le même état ; ce qui est conforme à la notion de phénomène irréversible. En vertu de cette analogie, le second principe de la thermodynamique apparaît comme étant un postulat statistique, une question de probabilité.

Une évolution d'idées scientifiques comme celle dont nous venons de parler est l'illustration d'un fait très général, bien qu'il puisse sembler un peu étrange au premier abord. Les grandes idées scientifiques n'ont pas coutume de conquérir le monde du fait que leurs adversaires finissent par les adopter peu à peu parce qu'ils finissent par se convaincre de leur vérité. Il est toujours très rare de voir un Saul devenir un Paul. Ce qui arrive le plus souvent, c'est que les adversaires d'une idée nouvelle finissent par mourir et que la génération montante s'y trouve acclimatée. Ici encore, s'applique l'adage : qui possède la jeunesse, possède l'avenir. C'est dire combien un

enseignement approprié de la jeunesse est important au point de vue du progrès scientifique ; vous me pardonnerez donc si j'insiste un peu là-dessus.

Ce qui est enseigné à l'école est moins important que la façon dont on l'enseigne. Un seul théorème de mathématique, s'il est vraiment compris par l'élève, a plus de valeur pour lui que dix formules apprises par cœur, sans en comprendre vraiment le sens, même s'il sait les appliquer correctement. Le but de l'école n'est pas de façonner en vue d'une routine spéciale, mais de former des esprits capables de penser méthodiquement et avec logique. Il ne sert de rien d'objecter à ce propos, qu'en dernière analyse, on poursuit, non pas le savoir proprement dit, mais le pouvoir. Certes un savoir qui ne procure aucun pouvoir est sans valeur et une théorie n'acquiert d'importance qu'en vue de ses applications ; mais jamais aucune théorie ne sera susceptible d'être remplacée par une vulgaire routine qui restera toujours impuissante dans les cas qui sortent de l'ordinaire. C'est pourquoi la première condition pour la formation d'hommes vraiment capables est un enseignement préparatoire élémentaire mais approfondi, dans lequel l'accent sera mis, moins sur l'abondance des matières que sur la façon dont elles sont traitées. Si cette préparation n'est pas acquise à l'école, elle ne saurait l'être plus tard : les écoles spéciales et les universités ont en effet d'autres tâches à remplir. Du reste, le but suprême de l'éducation ne consiste pas à emmagasiner des connaissances théoriques, ni à développer des capacités pratiques, il consiste à acquérir l'art de se bien conduire. Cependant, comme la conduite présuppose les capacités et les

capacités le savoir, la vraie compréhension est une condition indispensable et du pouvoir et de la conduite. Notre temps, épris de rapidité, accueille avec une faveur spéciale toutes les nouveautés sensationnelles ; aussi est-il incliné à accorder une place dans l'éducation à certains résultats de grande envergure avant qu'ils soient suffisamment mûris. Le public est favorablement impressionné quand il sait que les questions scientifiques les plus modernes ont leur place dans les programmes de l'enseignement secondaire ; pourtant il n'y a rien de plus sujet à caution qu'une telle introduction. Dès lors qu'il ne saurait être question de traiter à fond ces questions, tout ce que l'on peut faire, c'est de cultiver chez les élèves un penchant à la facilité intellectuelle qui examine tout au pas de course, et la vénération pour les idées creuses, prises pour de la science. Je considère donc qu'il serait tout à fait inopportun d'introduire dans les programmes de l'enseignement secondaire la théorie de la relativité et la théorie des quanta. Les élèves supérieurement doués seront toujours l'exception et ce n'est pas pour eux que les programmés sont faits. La question de la validité absolument générale du principe de la conservation de l'énergie est sérieusement contestée à l'heure actuelle dans la physique nucléaire ; cependant la mettre en doute devant des écoliers serait une erreur pour laquelle le mot de non-sens pédagogique n'est pas trop fort.

Ce qui peut sortir d'un enseignement toujours à la hauteur des « derniers progrès de la science » nous ne le voyons hélas ! que trop. Souvenons-nous de la façon dont on entend parler de la faillite des sciences exactes dans le grand public. Une des

marques les plus frappantes de la confusion des esprits actuelle est certainement le grand nombre des cerveaux inventifs qui s'efforcent de trouver des dispositifs en vue de créer une quantité d'énergie illimitée, ou qui s'efforcent de rendre inoffensifs le mystérieux rayonnement terrestre devenu récemment à la mode. Encore plus étonnante est la facilité avec laquelle ces inventeurs trouvent de bienveillants commanditaires, alors que des recherches scientifiques très importantes et susceptibles d'être très fécondes doivent être ralenties ou même interrompues, faute d'argent. Tout ceci pour prouver qu'une formation scolaire solide aurait été très utile, non seulement aux inventeurs, mais encore aux prêteurs.

Après cette digression dans le domaine pédagogique, nous reviendrons à notre sujet et nous examinerons une autre idée physique dont le destin changeant est peut être encore plus instructif que l'histoire de la chaleur : je veux dire l'idée de la nature de la lumière.

Les premières recherches sur la nature de la lumière sont contemporaines de la mesure de sa vitesse. L'idée qui amena Newton à formuler sa théorie de l'émanation est de comparer un rayon lumineux à un jet d'eau et la vitesse de la lumière à celle des particules qui se déplacent en ligne droite dans le jet. Cette hypothèse ne permettait pas de rendre compte du phénomène d'interférence, c'est-à-dire du fait que deux rayons lumineux arrivant ensemble à un même endroit peuvent, dans certaines circonstances, y créer de l'obscurité ; aussi la théorie de Newton fut-elle abandonnée et remplacée par la théorie de

l’ondulation de Huyghens. Selon cette nouvelle conception, la propagation de la lumière est semblable à la propagation d’une onde dans l’eau. Cette onde se propage concentriquement, du point d’émission dans toutes les directions avec une vitesse qui n’a rien à voir avec celle des particules d’eau. Cette fois-ci, la théorie expliquait parfaitement les phénomènes d’interférence, car deux ondes concourantes peuvent parfaitement s’annuler mutuellement si le sommet de l’une coïncide avec le creux de l’autre. Pourtant, le règne de la théorie ondulatoire ne dura pas plus d’un siècle parce qu’elle échoua quand il fallut expliquer les effets d’un rayon de courte longueur d’onde, à grande distance. Nous savons, en effet, que l’intensité lumineuse décroît comme le carré des distances, c’est pourquoi on ne peut pas comprendre comment un rayon peut développer une énergie qui est tout à fait indépendante de son intensité et qui peut être relativement très grande dans le cas d’ondes courtes comme les rayons X ou γ. Une manifestation aussi puissante, dans le cas de l’intensité lumineuse la plus faible, ne peut s’expliquer que si l’énergie lumineuse est répartie en particules discrètes ou quanta, ce qui suppose, jusqu’à un certain point, un retour à l’ancienne théorie de Newton.

La situation qui résulte de cet état de chose est extrêmement peu réjouissante ; car les deux hypothèses sont en face l’une de l’autre comme deux adversaires de force égale. Chacun des deux combattants possède une arme bien aiguisée ; mais il a aussi un point vulnérable. Tout ce qu’on peut dire de certain à l’heure actuelle, c’est qu’aucune des deux hypothèses ne pourra triompher exclusivement. La décision proviendra, au

contraire, de ce qu’ayant adopté un point de vue plus large, on pourra, par là même, mettre clairement en évidence, ce par quoi chacune des hypothèses se justifie, et ce par quoi elle est trop étroite.

Pour trouver ce point de vue plus général, il nous faudra tourner notre attention vers la source dont procède toute expérience, c’est-à-dire, dans le cas présent, vers les phénomènes qui ont lien quand on effectue une mesure optique. Il nous faudra donc inclure les instruments de mesure parmi les objets qui doivent être soumis à notre examen. Or c’est là une démarche dont la portée est, en principe, énorme, car elle revient à introduire en physique le concept de totalité. Suivant la nouvelle manière de voir, pour arriver à élucider complètement les lois d’un phénomène optique, il est nécessaire, non seulement de les considérer dans le lieu où ils prennent naissance et se propagent, mais encore de soumettre à un examen attentif tout le processus de mesure. Les instruments ne sont pas des récepteurs purement passifs, se contentant d’enregistrer le rayonnement qui leur parvient ; ils ont une part active dans la mesure et en conditionnent causalement le résultat. Seul le système comprenant à la fois l’instrument et le phénomène, peut être considéré comme un tout physique obéissant à des lois.

Il serait très difficile, à l’heure actuelle, de dire si l’évolution de toutes les idées physiques aura un cours analogue ; l’avenir sent pourra nous renseigner à ce sujet. Nous continuerons donc notre enquête en quittant le domaine un peu spécial de la

physique et nous considèrerons des problèmes d’une portée plus générale.

Tout d’abord, nous nous demanderons s’il est possible de prédire avec tant soit peu de sécurité, les transformations futures d’une idée scientifique quelconque. Est-il possible, même très approximativement, de parler de lois contraignantes quand il s’agit de l’évolution de ces idées ? Un coup d’œil rétrospectif pourrait presque nous permettre de conjecturer qu’il en est bien ainsi. Nous voyons, en effet, la plupart des grandes idées mener d’abord une existence cachée au milieu de l’incompréhension générale, elles ne sont tout au plus que soupçonnées par de rares savants trop tôt venus au monde ; plus tard seulement, quand l’humanité est devenue mûre pour ces découvertes, on les voit surgir brusquement au grand jour, comme par un coup de baguette magique. Il arrive souvent que les mêmes découvertes soient faites simultanément, en des lieux différents, par des savants travaillant indépendamment les uns des autres. Si l’on étudie, par exemple, l’histoire du principe de la conservation de l’énergie, on peut en découvrir la trace pendant des siècles avant son apparition proprement dite. C’est seulement au milieu du siècle dernier que ce principe a trouvé une formule scientifiquement utilisable, et cette découverte a été faite simultanément par cinq ou six savants, s’ignorant complètement. Il ne serait donc pas trop hardi d’avancer que si Julius Robert Mayer, James Prescott Joule, Ludwig August Colding et Hermann von Helmholtz n’avaient pas alors existé, le principe de la conservation de l’énergie n’en aurait pas moins été découvert peu de temps après. J’irai même

plus loin et je m'aventurerai volontiers jusqu'à faire une supposition analogue, en ce qui concerne la naissance des théories de la physique moderne telles que la théorie de la relativité et la théorie des quanta, si je ne craignais de m'exposer au reproche de jouer le rôle d'un prophète du passé.

Je crois que ce qu'il y a de fatal dans l'évolution des idées susdites, provient de l'extension toujours croissante de la technique expérimentale et de la perfection de plus en plus grande apportée aux méthodes de mesure. Ce sont là les circonstances qui ont lancé, presque automatiquement, la recherche théorique dans une certaine direction.

Cependant, il serait insensé au plus haut point de s'imaginer que les lois concernant l'origine et l'évolution des idées scientifiques, pourront jamais se laisser réduire en formules exactes applicables à la prédiction de l'avenir de la science. En dernière analyse, toute idée nouvelle procède, en effet, de l'imagination créatrice de son auteur ; c'est pourquoi toute recherche, même en mathématique, la plus exacte pourtant de toutes les sciences, contient toujours quelque part un élément irrationnel, cet élément étant essentiellement inhérent à la notion même de personnalité.

Toute idée, ne l'oublions pas, est liée à une certaine impression, aussi est-il naturel et facile de concevoir pourquoi l'époque présente, si riche en impressions nouvelles qui s'entrechoquent, est dans des conditions particulièrement favorables à l'éclosion d'idées nouvelles. D'autre part, nous pouvons aussi remarquer que, pour formuler une idée, il faut toujours mettre en rapport

deux événements différents et nous en conclurons, par application de simples règles de calcul combinatoire, que le nombre des idées possibles est d’un ordre de grandeur bien supérieur à celui des événements qui sont à notre disposition.

Pour expliquer cette production surabondante d’idées scientifiques qui caractérise l’époque actuelle, il faudrait aussi faire intervenir la très grande généralisation du chômage. En raison de ce fait, il y a un très grand nombre de gens doués d’un tempérament d’intellectuel qui, éprouvant le besoin de se livrer à une activité productive, trouvent dans l’étude de toutes sortes de questions philosophiques ou théoriques, une planche de salut pour échapper au vide de leur existence quotidienne. Malheureusement il est rare de voir un résultat appréciable sortir de tout ce travail.

Je n’exagère pas en disant qu’il n’y a pour ainsi dire pas de semaine où je ne reçoive une, voire plusieurs communications écrites, plus ou moins longues, provenant de personnes ayant exercé des professions les plus diverses (instituteurs, fonctionnaires, littérateurs, juristes, médecins, etc.) ; ces envois sont accompagnés, naturellement, d’une demande d’emploi ; de telle sorte qu’il me faudrait beaucoup plus de temps de libre que je n’en ai pour examiner tout cela à fond.

Je puis néanmoins, d’après leur contenu, classer ces écrits en deux catégories : la première comprend des élucubrations tout à fait naïves dont les auteurs ignorent complètement qu’une idée scientifique nouvelle, pour être valable, doit s’appuyer sur des faits bien définis et que, par suite, il est nécessaire d’avoir

quelques connaissances un peu plus développées dans le domaine que cette idée concerne, pour arriver à la formuler correctement. Ces gens se figurent pouvoir deviner directement la vérité par une sorte d'intuition géniale et ils ne soupçonnent même pas que les grandes découvertes ont toujours été précédées par une période de dur travail solitaire. Ils s'imaginent que la découverte, tant souhaitée, leur est tombée du ciel toute faite par un heureux coup du hasard ; de même que, jadis, la gravitation universelle a été trouvée par Newton confortablement assis sous un pommier. Ce qu'il y a de pire dans le cas de tels fantaisistes, capables de flotter par toutes les eaux, mais nullement d'y pénétrer, c'est qu'ils sont incorrigibles, en raison de leur manque de formation scientifique, et c'est aussi qu'ils sont la source de dangers qu'il ne faut pas sous-estimer. En raison de l'intérêt très louable que la jeunesse actuelle porte aux questions les plus générales et du désir qu'elle a de se faire une idée satisfaisante de l'univers, il convient d'attirer tout spécialement l'attention sur ce fait qu'un système de l'univers n'est qu'une construction en l'air, destinée à s'écrouler au premier souffle, si elle n'est pas fondée sur le terrain solide de la réalité. Celui qui veut édifier une telle construction, doit donc savoir parfaitement à quoi s'en tenir sur le terrain des faits.

Certes, à l'heure actuelle, il n'est plus possible, pour un savant isolé, de posséder une expérience directe quelque peu complète dans tous les domaines scientifiques ; dans la plupart des cas, il devra s'en tenir à une information de seconde main. Mais il lui sera d'autant plus indispensable, qu'au moins dans un domaine

particulier, il se sente tout à fait chez lui et qu'il puisse juger par lui-même en connaissance de cause. C'est pourquoi, en qualité de membre de la faculté de philosophie, je n'ai jamais cessé de réclamer que tout candidat au titre de docteur en philosophie puisse faire preuve de connaissances spéciales, dans une science particulière au moins. Il importe peu que cette science soit une science de la nature ou une science de l'esprit ; mais il est essentiel que le futur docteur ait acquis par voie d'expérience personnelle une idée de ce qu'est la méthode du travail scientifique.

S'il est, en général, vite fait d'arriver à mettre en évidence la nullité des écrits de la première catégorie, la seconde, par contre, mérite plus d'attention ; car il s'agit d'auteurs qui doivent être tout à fait pris au sérieux, en raison des résultats excellents qu'ils ont obtenus dans leur spécialité. La division du travail scientifique entraîne une spécialisation de plus en plus étroite du savant ; aussi n'est-il pas étonnant que ce dernier éprouve de plus en plus vivement le besoin de jeter un regard au delà des frontières de son domaine propre. S'appuyant alors sur les connaissances qu'il y aura acquises, nous le verrons chercher à les utiliser dans une autre partie de la science. Il sera très porté à rattacher ensemble des domaines très éloignés par des associations d'idées qui lui sont familières et qui lui paraissent évidentes. Ces idées seront pour lui comme un pont, grâce auquel il transportera dans un domaine étranger le genre de lois auquel il est accoutumé dans sa spécialité ; et il s'en servira pour résoudre des questions encore pendantes. Chez les mathématiciens, les physiciens et les chimistes

notamment, on trouve une tendance à appliquer les méthodes exactes de leurs sciences, à l'élucidation des problèmes de la biologie et de la psychologie. Mais, il ne faut pas l'oublier, pour qu'un tel pont idéologique ait une portée convenable, il ne suffit pas qu'un de ses piliers ait des fondations solides, il faut aussi que l'autre repose sur le roc ; sans quoi la construction ne répondrait pas à son but. Ou, pour parler d'une façon plus concrète, il ne suffit pas qu'un savant doué d'un esprit inventif, connaisse à fond sa spécialité ; il doit aussi, pour rendre fécondes des conceptions les plus vastes qui sortent de ce domaine, être familier, jusqu'à un certain point, avec les faits et les problèmes du nouveau domaine auquel se rapporte son travail actuel. Il nous semble même nécessaire d'insister tout particulièrement sur cette condition parce qu'un spécialiste apprécie d'autant plus l'importance de sa branche qu'il y travaille depuis plus longtemps et qu'il a dû y surmonter des difficultés plus grandes. S'il lui est arrivé de trouver, pour un problème une solution heureuse, il sera aisément tenté d'en exagérer l'importance et d'utilise= sa découverte dans des cas où les circonstances sont peut-être entièrement différentes. Celui qui éprouve le besoin de se placer à un point de vue plus élevé que ne lui permet l'étroitesse de sa spécialité, ne devrait pas oublier que dans les autres branches de la science il y a aussi des savants qui, pour travailler avec des méthodes différentes, n'en sont pas moins aux prises avec des difficultés aussi grandes que les siennes. Malheureusement, l'histoire de toutes les sciences montre que semblable prudence n'a pas toujours été observée ; mais, pour ne pas m'exposer à tomber

moi-même dans le travers que je signale, je me bornerai à ne citer que des exemples tirés de la physique.

Parmi les concepts généraux de la physique, il n'en est peut-être pas un seul qui n'ait été plus ou moins souvent et, avec plus ou moins d'adresse, transporté dans d'autres domaines par une association d'idées résultant d'un ensemble de circonstances externes quand elle n'est pas tout simplement le résultat d'un rapprochement de terminologie purement fortuit.

Par exemple, le mot énergie, conduit facilement à transporter la notion physique d'énergie et le principe de sa conservation sur le terrain de la psychologie. Il est même arrivé que l'on se soit très sérieusement essayé à trouver des lois exprimables mathématiquement pour rendre compte de l'origine et du degré du bonheur humain.

On peut loger aussi à la même enseigne les tentatives faites pour utiliser le principe de relativité en dehors de la physique, par exemple, en esthétique ou en éthique. Et cependant, il n'y a rien de plus décevant que cette phrase creuse : « tout est relatif » ? Déjà en physique, elle est inexacte : toutes les constantes universelles, telles la masse et la charge de l'électron ou du proton, la valeur du quantum d'action, sont des grandeurs absolues. Elles sont les pierres fondamentales de toute l'atomistique. Certes, il est arrivé qu'une grandeur tenue primitivement pour absolue ait été considérée ultérieurement comme relative ; mais quand cela s'est produit, cela a toujours eu lieu parce que cette grandeur a été ramenée à une autre grandeur plus absolue, je veux dire absolue en un sens plus vrai

et plus profond. Il est en effet impossible d’élaborer aucun concept, d’édifier aucune théorie si l’on ne suppose pas, au préalable, qu’il y a des grandeurs absolues.

Le second principe de la thermodynamique, ou principe de l’accroissement de l’entropie, a, lui aussi, reçu des interprétations extraphysiques. La proposition, d’après laquelle le cours de tous les phénomènes physiques a lieu dans un seul sens, a été citée à l’appui de considérations évolutionnistes en biologie. Cette tentative doit pourtant être considérée comme singulièrement malheureuse, puisque le mot d’évolution est inséparablement lié à l’idée d’une marche dans une direction ascendante et, par conséquent, à celle de progrès, d’anoblissement. Le principe de l’entropie est une loi de probabilité. Il signifie, au fond, tout simplement, qu’un état moins probable est en moyenne suivi d’un état plus probable. Si on veut transposer cette loi en biologie, il faudrait donc plutôt penser à une dégénérescence qu’à un anoblissement ; car le désordonné, l’ordinaire, le vulgaire, est, *a priori*, plus probable que l’ordonné, l’excellent, le supérieur.

À toutes les idées trompeuses dont nous venons de parler, il convient d’ajouter encore une autre classe d’idées, à savoir celles qui n’ont absolument aucun sens : le rôle qu’elles jouent en physique n’est pas mince. L’assimilation du mouvement d’un électron autour du noyau atomique à celui d’une planète autour du soleil a fait que la question de la position et de la vitesse de l’électron s’est posée, et, cependant, les travaux ultérieurs des physiciens ont montré que l’on ne peut pas

répondre à la fois à ces deux questions. C'est là un exemple qui montre combien il est aventureux de vouloir transposer des notions dans un domaine qui n'est pas celui où elles ont fait leurs preuves et combien il faut être prudent quand on formule et quand on contrôle des idées nouvelles.

Cependant, il y a aussi le revers de la médaille et il est grand temps que nous en parlions. Si, pour accorder le droit de cité à une idée scientifique, nous exigions que cette idée ait déjà été justifiée définitivement, et même, si nous nous contentions de demander que cette idée ait un sens suffisamment net, il est certain que nous aboutirions parfois à causer un dommage grave au progrès de la science. Nous ne devons pas oublier que, souvent, les idées confuses ont été les causes les plus actives d'un développement scientifique extrêmement brillant.

Personne plus que Gœthe n'a eu le sentiment de cet antagonisme ; il en a porté la préoccupation toute sa vie et il l'a exprimé sous les formes les plus diverses avec un accent qui ne pourra jamais être surpassé. Pour résoudre l'opposition, il eut recours au concept de totalité et grâce à ce concept les deux points de vue purent être admis à faire valoir leurs droits. Mais, malgré l'ampleur de son génie, Gœthe n'échappa pas aux limitations qui lui étaient imposées par le temps où il vivait. Il ne voulut jamais admettre qu'il y ait lieu de séparer les rayons lumineux, qui sont dans l'espace extérieur, de la sensation de lumière, qui est dans la conscience. Aussi fut-il incapable d'apprécier à leur juste valeur les progrès, pourtant éclatants, de l'optique physique. Cependant, s'il pouvait voir l'idée de

totalité s'intégrer à la physique comme elle le fait aujourd'hui, il y trouverait la confirmation de ses idées.

La science contient, nous l'avons déjà dit occasionnellement, un noyau d'irrationnalité que l'esprit le plus pénétrant ne saurait extirper. On ne saurait le faire disparaître, bien que la chose soit souvent tentée de nos jours, en limitant la tâche de la science. Si quelqu'un s'en étonnait ou en ressentait du mécontentement, qu'il veuille bien considérer que c'est là une nécessité. Un examen un peu attentif permet, en effet, de se rendre compte, sans difficulté, que toute science (naturelle ou psychologique) ne prend pas son ouvrage à son origine, mais, pour ainsi dire en son milieu. Elle s'efforcera ensuite de remonter plus ou moins péniblement et en hésitant jusqu'au commencement sans avoir l'espoir d'y parvenir jamais complètement. La science ne trouve pas tout faits les principes avec lesquels elle travaille, il lui faut les créer artificiellement et, plus tard, si elle les perfectionne, ce ne sera que peu à peu.

Elle puise dans la vie et, se retournant vers la vie, elle agit sur elle.

La chimie est sortie de l'idée de l'élixir de longue vie et de l'idée de la fabrication de l'or. La notion de l'énergie est sortie de l'idée du mouvement perpétuel. La théorie de la relativité a son origine dans les tentatives faites pour mesurer la vitesse absolue de la terre. La physique atomique est née de l'assimilation du mouvement des électrons au mouvement planétaire. Ce sont là des faits qu'il est impossible de traiter par le dédain et qui donnent beaucoup à penser. Ils nous montrent

que dans la science aussi s’applique l’adage : « la fortune sourit aux audacieux. » Pour réussir, c’est une vérité d’une application très générale qu’il faut toujours viser un but plus haut que celui qui peut être finalement atteint.

À la lumière de ces considérations, les idées scientifiques nous apparaissent sous un jour tout nouveau, nous sommes amenés à penser que l’importance d’une idée scientifique réside moins dans ce qu’elle contient de vérité que dans ce qu’elle contient de valeur. Tel est le cas, par exemple, de l’idée de la réalité du monde extérieur et de l’idée de causalité. Pour ces deux idées, la question qui se pose n’est pas : sont-elles vraies ou sont-elles fausses ? Mais : valent-elles quelque chose ou ne valent-elles rien ? Et c’est là une chose d’autant plus extraordinaire, que l’idée de valeur leur est, *a priori*, étrangère à une science tout objective comme la physique.

Il faut pourtant que nous expliquions comment l’importance d’une idée physique ne peut être complètement saisie que si l’on en a examiné la valeur. L’unique moyen d’y arriver sera celui qui s’est déjà offert à nous à propos d’un problème spécial d’optique dont nous avons parlé plus haut, et, ceci ne vaut pas seulement pour la physique, mais pour toute autre science. Nous nous tournerons vers la source de laquelle toute science tire son origine et sans laquelle aucune d’elle ne serait concevable : nous voulons dire vers l’esprit du savant qui élabore la science et qui la communique à d’autres. C’est dire que nous ferons encore appel au concept de totalité.

De même qu'un phénomène physique ne saurait être séparé, en principe, des instruments de mesure et des organes sensibles par lesquels on en prend connaissance ; de même aussi est-il impossible de séparer la science des savants qui l'édifient. De même que le physicien qui étudie expérimentalement un phénomène atomique en perturbe d'autant plus fortement le cours avec ses instruments qu'il cherche davantage à en pénétrer tous les détails ; de même que le physiologiste qui dissèque un organisme en ses parties les plus délicates endommage par ce fait cet organisme, de même aussi le philosophe qui pour juger une idée scientifique nouvelle se borne à déterminer dans quelle mesure cette idée peut être clairement comprise, *a priori*, entrave l'élan du progrès scientifique. C'est pourquoi le point de vue du positivisme qui rejette toute idée transcendantale est trop borné et le point de vue métaphysique qui méprise le détail expérimental, l'est également dans un sens opposé. Tous les deux peuvent se justifier et l'on peut s'y tenir en restant dans la logique ; mais, poussés à l'extrême, tous les deux paralysent le progrès scientifique, parce qu'ils écartent, *a priori*, certaines questions, à vrai dire pour des raisons opposées, la métaphysique, parce qu'elles sont déjà résolues ; le positivisme parce qu'elles n'ont pas de sens.

Il y a là deux tendances qui s'affrontent ; mais jamais aucune des deux ne pourra arriver à prévaloir définitivement contre l'autre. Nous voyons d'ailleurs que la tournure générale des esprits oscille sans cesse de l'une à l'autre. Il y a cent ans, la

métaphysique prétendait à la domination universelle : on sait à quel effondrement lamentable a abouti cette prétention.

Le positivisme prétend à son tour à l'omnipotence, il n'y parviendra pas davantage. Sa force motrice latente, sa cohésion et les raisons de son succès se trouvent dans ses idées directives. Ce sont les idées qui posent les problèmes aux savants, ce sont elles qui l'aiguillonnent sans cesse dans son travail, ce sont elles qui lui ouvrent les yeux et lui font interpréter avec rectitude les résultats trouvés. Faute d'idées, toute recherche est sans plan et l'énergie qui y est déployée tourne à vide. Les idées, seules, font de l'expérimentateur un physicien, du chroniqueur un historien, de l'expert en écritures un philologue. Et dans tout ceci, la grande question, comme nous l'avons déjà vu, n'est pas toujours de savoir si telle idée est vraie ou fausse, pas même de savoir si elle a un sens nettement énonçable, mais bien plutôt de savoir si l'idée sera la source d'un travail fécond. Le travail est, en effet, dans tous les domaines qui touchent à l'évolution de la civilisation, qu'il s'agisse de la vie individuelle ou collective, et, par suite, dans le domaine scientifique, le seul critérium infaillible de l'œuvre saine à qui le succès est promis.

CHAPITRE XII

LA SCIENCE ET LA FOI

Innombrables sont véritablement les impressions que chacun de nous reçoit pendant le cours d’une année, on pourrait presque dire que nous en sommes, chaque jour, submergés. En raison des progrès inouïs qui ont été apportés aux moyens de communication et d’entente entre les hommes, les obstacles créés par la distance existent de moins en moins. À vrai dire, ces impressions sont souvent aussi vite oubliées qu’elles sont venues, tellement vite quelquefois, qu’il n’en reste pas trace du jour au lendemain. Mais il est bon qu’il en soit ainsi ; car s’il en était autrement, l’homme contemporain serait opprimé jusqu’à l’asphyxie sous un tel déluge. D’ailleurs, en réaction contre ce flot perpétuellement mouvant d’images qui envahissent la mémoire, nous trouvons chez tous ceux qui ne veulent pas traverser l’existence à la manière d’un éphémère, le souci de plus en plus fort de s’appuyer sur quelque chose de stable, sur une richesse spirituelle capable de leur fournir un point d’appui solide dans le chaos des vicissitudes de la vie quotidienne. Ainsi s’explique dans la jeunesse arrivée aujourd’hui à l’âge mûr, exaspéré jusqu’en devenir une véritable soif, le désir d’une conception aussi vaste que possible de l’univers. Cette soif, elle tâchera de l’étancher comme elle le pourra et, par les voies les plus diverses, tant est

grande sa hâte de trouver un asile de rafraîchissement et de paix pour son esprit tourmenté.

L’Église dont c’est la vocation de satisfaire les besoins de cette sorte, n’est pas souvent, à notre époque, en état de satisfaire des esprits envahis par le doute, parce qu’elle exige une foi soumise. Aussi arrive-t-il fréquemment que l’on ait recours aux substituts les plus suspects de l’idée religieuse et que l’on accueille à bras ouverts les prophètes nouveaux, sensés apporter des messages de salut plus certains.

Il est vraiment étonnant de constater combien de gens cultivés sont entrés dans le sillage de ces religions nouvelles où ils subissent une séduction qui relève tantôt de la mystique la plus dévoyée et tantôt de la plus basse superstition.

L’idée séduisante d’essayer d’édifier une conception de l’univers sur une base scientifique est, en général, repoussée par la catégorie de personnes dont nous venons de parler sous prétexte que la conception scientifique de l’univers a fait faillite. Dans cette affirmation, il y a d’ailleurs une part de vérité ; elle est même pleinement justifiée si l’on prend le mot « science », comme il est très fréquemment arrivé, dans un sens purement rationnel ; mais celui qui se comporte ainsi prouve qu’il est intérieurement très éloigné de l’esprit de la véritable science. Quiconque a travaillé réellement à l’édification d’une science quelconque, sait, par expérience, que pour franchir la porte, il faut un guide qui, pour être invisible, n’en est pas moins indispensable ; ce guide c’est une foi intrépide.

On dit souvent que la science ne fait pas d’hypothèses. Je ne crois pas qu’il y ait un adage ayant plus de désastres à son actif, faute d’avoir été bien compris. La base solide sur laquelle repose toute la science est constituée par son matériel de faits, c’est chose certaine ; mais ce qui ne l’est pas moins, c’est que ce matériel, même si on y adjoint une élaboration logique, ne suffit pas à faire la science. Le trésor des faits restera, en effet, toujours plus ou moins incomplet, il ne se composera jamais que de pièces détachées, si nombreuses qu’on veuille bien les supposer, et ceci s’applique aussi bien aux documents historiques qu’aux tables de mesures des sciences physiques et naturelles. Il est donc absolument nécessaire que les vides soient comblés et cela ne peut se faire qu’au moyen de liaisons idéologiques. Ces liaisons ne sont pas le résultat d’un travail logique, mais un produit de l’imagination créatrice du savant dont l’assentiment ne sera donc pas purement rationnel, même si le mot foi est trop fort pour le caractériser. En tout cas, nous sommes en présence d’une activité dépassant en quelque façon le donné expérimental. De même que d’un chaos de masses séparées, sans aucune force ordonnatrice, il ne peut sortir aucun cosmos, de même aussi aucune science ne peut surgir de l’accumulation d’un matériel de faits, sans l’intervention d’un esprit fécondé par la foi.

Cette manière plus profonde de concevoir la science est-elle susceptible d’engendrer une conception de l’univers d’un intérêt vital ?

Pour répondre à cette question, le mieux sera de jeter un coup d’œil sur la vie des hommes qui ont fait leur, cette conception et qui lui ont consacré leur existence. Il y a des savants innombrables pour qui leur science a été le soutien et le réconfort continuel d’une vie extérieurement misérable. Tel Johann Kepler, dont nous célébrions naguère le 300e anniversaire. Vue du dehors, sa vie n’a été qu’une longue suite de cruelles désillusions. Il fut toujours accablé par le souci du pain quotidien et ne put jamais se libérer de la gêne. À la fin de sa vie nous le voyons même contraint de réclamer à la diète, siégeant à Ratisbonne, le payement du reliquat de sa pension impériale. Mais le moment le plus douloureux de cette existence fut certainement celui où il dut prendre la défense de sa propre mère accusée de sorcellerie. Ce qui l’empêcha de céder au découragement et le soutint ans ses travaux, ce fut sa science et, par là, nous n’entendons pas seulement l’accumulation de données numériques résultant de ses observations astronomiques ; mais la foi à un univers régi par des lois rationnelles. Il serait très instructif de comparer Kepler sous ce rapport avec celui dont il fut le disciple, Tycho de Brahé. Ce dernier possédait, en effet, les mêmes connaissances scientifiques que son élève, il avait à sa disposition le même matériel observations, mais il lui manquait la croyance aux lois éternelles. C’est pourquoi Tycho de Brahé est connu seulement comme un astronome de valeur, tandis que Kepler est considéré comme étant le créateur de l’astronomie moderne.

Nous citerons encore le nom de Julius Robert Mayer, dont la découverte de l’équivalent mécanique de la calorie, sera bientôt

centenaire. Ce savant fut, il est vrai, moins en but aux soucis d'ordre matériel que Kepler ; mais par contre, sa théorie de l'indestructibilité de la force fut complètement méconnue du monde savant. Vers le milieu du siècle dernier, on éprouvait la plus grande méfiance envers tout ce qui avait l'air de s'apparenter à la philosophie naturelle. Mayer ne se laissa pourtant pas intimider par la conjuration du silence qui était établie autour de ses travaux. Il trouvait réconfort et apaisement, non pas tant dans ce qu'il savait, que dans ce qu'il croyait. Sa persévérance fut récompensée vers la fin d'une vie remplie des luttes les plus pénibles : l'organe le plus représentatif de la science à laquelle il s'était voué, la société des naturalistes et médecins allemands dont faisait partie Hermann Helmholtz, lui apporta enfin dans sa session annuelle de 1869 le témoignage officiel de reconnaissance qui lui avait tant fait défaut.

D'après ces exemples et d'autres, très nombreux, qui leur sont analogues et que nous ne pouvons citer, nous pouvons conclure que la croyance est bien la force qui donne sa véritable efficacité à l'accumulation de faits constitutive du matériel scientifique. Mais nous pouvons aller plus loin et ajouter que déjà, dans le travail de rassemblement de ce matériel, les pressentiments intuitifs dont elle est la source sont de nature à rendre les plus grands services. Ces pressentiments sont comme un guide et un aiguillon de l'activité sensible. Pour un historien qui recherche des archives et des documents officiels ou qui étudie ceux qu'il a découverts ; pour un savant qui, dans son laboratoire élabore des dispositifs expérimentaux et qui

examine par le menu les observations qu'il a faites, le travail se trouvera très simplifié et, notamment, facilitée la distinction indispensable entre l'essentiel et l'accessoire, s'il est dans une certaine disposition mentale plus ou moins clairement consciente qui l'éclairera dans l'examen et l'interprétation des résultats, après qu'elle lui aura servi de guide dans la série des opérations effectuées pour les obtenir. Le cas du mathématicien est tout à fait semblable, il lui arrivera de trouver un théorème nouveau dont il donnera la formule avant d'avoir pu le démontrer.

Cependant, il ne faut pas oublier que l'exercice de cette faculté d'intuition comporte un danger latent et des plus graves : le danger de solliciter les faits en faveur d'une idée préconçue ou même de passer sous silence ceux qui gêneraient. C'est là glisser de la vraie science à la pseudo-science qui n'est qu'une construction en l'air, destinée à s'écrouler au premier choc un peu fort.

Innombrables dans le passé, ont été les savants, jeunes et vieux, qui ont succombé victimes de leur conviction scientifique enthousiaste et, de nos jours, le péril n'a pas perdu de son importance. Pour s'en garder il n'existe qu'un moyen de protection : le respect des faits.

Plus un penseur est riche en idées, plus son imagination est féconde, plus il lui est indispensable de se pénétrer d'une chose : c'est que les faits, considérés dans le détail de leur individualité, restent toujours l'élément fondamental sans lequel il n'y aurait pas de science. C'est pourquoi, il devra

s’examiner lui-même avec un soin des plus scrupuleux pour se rendre compte s’il accorde bien à ces mêmes faits tout le respect qui leur est dû.

Quand nous aurons senti solide sous nos pieds, l’unique terrain que l’expérience de la vie réelle nous a montré être sûr, alors, mais alors seulement, nous pourrons nous fier sans arrière-pensée à une conception de l’univers fondée sur la croyance à l’existence, dans cet univers, d’un ordre rationnel.

---

1. ↑ G. Kirchhoff : Sur le rapport existant entre le pouvoir émissif et le pouvoir absorbant des corps pour la chaleur et la lumière. Recueil de ses œuvres, p. 597 (p. 17). Leipzig, J. A. Barth (1882).
2. ↑ H. Hertz : Ann. d. Physik, vol. 36, p. 1 (1889).
3. ↑ Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. du 20 févr. 1896. Ann. d. Physik, vol. 60, p. 577 (1897).
4. ↑ Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. du 18 mai 1899, p. 455.
5. ↑ L. Boltzmann : Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. du 5 mars 1898, p. 182.
6. ↑ W. Wien : Ann. d. Physik, vol. 58, p. 662 (1896).
7. ↑ D’après la loi de répartition de Wien la relation entre l’énergie U {\displaystyle \mathrm {U} } U d’un résonateur est donnée par la formule

$$\mathrm{U} = a \cdot e^{-\frac{b}{\mathrm{T}}}.$$

Si S désigne l’entropie du résonateur, on a :

$$\frac{1}{\mathrm{T}} = \frac{d\mathrm{S}}{d\mathrm{U}}.$$

Il en résulte que la grandeur R du texte a pour valeur

$$\mathrm{R} = 1 : \frac{d^{2}\mathrm{S}}{d\mathrm{U}^{2}} = -b\mathrm{U}.$$

8. ↑ D’après la loi du déplacement de Wien l’énergie d’un résonateur est liée à sa fréquence propre ν par la formule

$$\mathrm{U} = \nu \cdot f\left(\frac{\mathrm{T}}{\nu}\right).$$

9. ↑ Ann. d. Physik, vol. 1, p. 719 (1900).

10. ↑ O. Lummer et E. Pringsheim : Verhandl. d. Deutsch. Physik. Gesell., vol. 2, p. 163 (1900).
11. ↑ H. Rubens et F. Kurlbaum : Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. du 25 octobre 1900, p. 929.
12. ↑ Pour les grandes valeurs de T {\displaystyle \mathrm {T} } T on a, d’après H. Rubens et F. Kurlbaum U = c T {\displaystyle \mathrm {U} =c\mathrm {T} } $\mathrm{U} = c\mathrm{T}$ et, par suite, en opérant comme au no 7 :

   R = 1 : d 2 S d U 2 = − U 2 c {\displaystyle \mathrm {R} =1:{\frac {d^{2}\mathrm {S} }{d\mathrm {U} ^{2}}}=-{\frac {\mathrm {U} ^{2}}{c}}}

$$\mathrm{R} = 1 : \frac{d^2\mathrm{S}}{d\mathrm{U}^2} = -\frac{\mathrm{U}^2}{c}.$$

13. ↑ Si l’on pose alors :

   R = 1 : d 2 S d U 2 = − b U − U 2 c {\displaystyle \mathrm {R} =1:{\frac {d^{2}\mathrm {S} }{d\mathrm {U} ^{2}}}=-b\mathrm {U} -{\frac {\mathrm {U} ^{2}}{c}}}

$$\mathrm{R} = 1 : \frac{d^2\mathrm{S}}{d\mathrm{U}^2} = -b\mathrm{U} - \frac{\mathrm{U}^2}{c}.$$

   il en résulte par intégration :

   1 T = d S d U = 1 b log ⁡ (1 + b c U) {\displaystyle {\frac {1}{\mathrm {T} }}={\frac {d\mathrm {S} }{d\mathrm {U} }}={\frac {1}{b}}\log \left(1+{\frac {bc}

{\mathrm {U} }}\right)}

$$\frac{1}{\mathrm{T}} = \frac{d\mathrm{S}}{d\mathrm{U}} = \frac{1}{b}\log\left(1+\frac{bc}{\mathrm{U}}\right)$$

d’où l’on tire la formule de rayonnement :

U = b c e b T − 1 {\displaystyle \mathrm {U} ={\frac {bc}{e^{\frac {b}{\mathrm {T} }}-1}}}

$$\mathrm{U} = \frac{bc}{e^{\frac{b}{\mathrm{T}}}-1}.$$

14. ↑ Cf. W. Nernst et Th. Wulf : Verh. d. Deutsch. Physik. Ges., vol. 21, p. 224 (1919).
15. ↑ La valeur absolue de l’énergie est en effet égale au produit de la masse inerte par le carré de la vitesse de la lumière.
16. ↑ Verh. d. Deutsch. Physik. Ges. du 14 décembre 1900, p. 237.
17. ↑ La formule générale qui donne l’énergie moyenne d’une molécule de gaz est, si k {\displaystyle k} k représente la première constante du rayonnement U = 3 2 k T {\displaystyle \mathrm {U} ={\frac {3}{2}}k\mathrm {T} } $\mathrm{U} = \frac{3}{2}k\mathrm{T}$.

    Si l’on pose T = U {\displaystyle \mathrm {T} =\mathrm {U} } $\mathrm{T} = \mathrm{U}$ on a k = 2 / 3 {\displaystyle k=2/3} $k = 2/3$. Par contre dans l’échelle

conventionnelle des températures (absolues selon Kelvin), T {\displaystyle \mathrm {T} } T est défini de telle façon que ta différence de température entre l’eau bouillante et la glace fondante est posée égale à 100.

18.↑ Cf. par ex. L. Boltzmann : « En souvenir de Joseph Lohschmidt ». Ouvrages de vulgarisation, p. 245, 1905.
19.↑ E. Rutherford et H. Geiger, Proc. Roy. Soc. A, vol. 81, p. 62 (1908).
20.↑ Cf. R. A. Millikan : Phys. Ztschr., vol. 14, p. 796 (1913).
21.↑ Le calcul de la probabilité d’un état physique repose, en effet, sur le dénombrement du nombre fini des cas particuliers également probables, par lesquels l’état considéré est réalisé et, pour la délimitation séparative de ces cas particuliers, il faut adopter un point de vue déterminé en ce qui concerne la notion de chaque cas particulier.
22.↑ A. Einstein : Ann. d. Physik, vol. 17, p. 132 (1905).
23.↑ A. Einstein : Ann. d. Physik, vol. 22, p. 180 (1907).
24.↑ M. Born et Th. v. Kármán : Phys. Ztschr., vol. 14, p. 15 (1913).
25.↑ P. Debye : Ann. d. Physik, vol. 39, p. 789 (1912).
26.↑ W. Nernst : Phys. Ztschr., vol. 13, p. 1064 (1912).
27.↑ A. Eucken : Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss., p. 141 (1912).
28.↑ O. Sackur : Ann. d. Physik, vol. 36, p. 958 (1911).

29.↑ O. Stern : Phys. Ztschr., vol. 4, p. 629 (1013) ; Tetrode : Ber. d. Akad. d. Wiss. v. Amsterdam, 27 février et 27 mars 1915.
30.↑ J. Franck et G. Hertz : Verhandl. d. Deutsch. Physik. Ges., vol. 16, p. 512 (1914).
31.↑ Ph. Lenard : Ann. d. Physik, vol. 8, p. 149 (1902).
32.↑ R. Ladenburg : Verh. d. Deutsch. Physik. Ges., vol. 9, p. 504 (1907).
33.↑ R. A. Millikan : Phys. Ztschr., vol. 17, p. 217 (1916).
34.↑ Warburg : Sur l'échange d'énergie dans les réactions photochimiques des gaz. Sitz. Ber. d. Preuss. Akad. d. Wiss. depuis 1911.
35.↑ M. Born : *Phil. Mag.*, vol. 30, p. 394 (1915).
36.↑ A. Sommerfeld : Ann. d. Physik, vol. 51, pp. 1 et 125 (1916).
37.↑ F. Paschen : Ann. d. Physik, vol. 50, p. 901 (1916).
38.↑ P. Epstein : Ann. d. Physik, vol. 50, p. 480 (1916).
39.↑ P. Debye : Phys. Ztschr., vol. 18, p. 276 (1918).
40.↑ E. Wagner : Ann. d. Physik, vol. 67 (1918) ; R. Ladenburg : Jahrb. d. Radioaktivität u. Eleletronik, vol. 17, p. 144 (1920).
41.↑ P. Ehrenfest : Ann. d. Physik, vol. 51, p. 327 (1916).

Retrouver un article

Initiations à la physique....1
Table des matières....3
AVANT-PROPOS....5
CHAPITRE PREMIER L'UNITÉ DE LA CONCEPTION DE L'UNIVERS EN PHYSIQUE....9
I....9
II....17
III....30
IV....41
CHAPITRE II VOIES D'ACCÈS NOUVELLES À LA CONNAISSANCE EN PHYSIQUE....53
CHAPITRE III LOIS STATISTIQUES ET LOIS DYNAMIQUES....71
CHAPITRE IV LA GENÈSE ET L'ÉVOLUTION DE LA THÉORIE DES QUANTA....93
ANNOTATIONS....115
CHAPITRE V LA LOI CAUSALE ET LE LIBRE ARBITRE....121
I....124
II....128
III....142
IV....150
V....165
VI....171
CHAPITRE VI DU RELATIF À L'ABSOLU....177
CHAPITRE VII DE LA NATURE DES LOIS PHYSIQUES....201
I....201
II....215
III....225

CHAPITRE VIII L'UNIVERS TEL QU'IL EST AUX YEUX DE LA PHYSIQUE MODERNE................241
I...241
II..248
III...252
IV..267
CHAPITRE IX LE POSITIVISME ET LA RÉALITÉ DU MONDE EXTÉRIEUR...279
I...280
II..292
III...304
CHAPITRE X LA CAUSALITÉ DANS LA NATURE...313
CHAPITRE XI ORIGINE ET ÉVOLUTION DES IDÉES SCIENTIFIQUES..351
CHAPITRE XII LA SCIENCE ET LA FOI.....................379
Retrouver un article..391

Imprimé le 2-2025 par

imprimervoslivres